

SANDRO HENRIQUE DE FARIA

**O USO DO GEORADAR NA DETERMINAÇÃO DE
PARÂMETROS DA ESTRUTURA DE PAVIMENTOS
FLEXÍVEIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2010

SANDRO HENRIQUE DE FARIA

**O USO DO GEORADAR NA DETERMINAÇÃO DE
PARÂMETROS DA ESTRUTURA DE PAVIMENTOS
FLEXÍVEIS**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, para
obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 29 de junho de 2010.

Prof. Paulo Roberto Antunes Aranha
(Coorientador)

Prof. Carlos Alexandre Braz de Carvalho
(Coorientador)

Prof. Marcio Rocha Francelino

Prof. Vicente Paulo Soares

Prof. Carlos Antônio Oliveira Vieira
(Orientador)

“Em nossas ações e pensamentos, não tenhamos em vista a nossa satisfação, mas somente a vontade de Deus.”
(Santo Afonso)

“Copiosa Apud Eum Redemptio”
(Santo Afonso)

“Triste época! É mais fácil desintegrar um átomo do que um preconceito”
(Albert Einstein)

Aos meus queridos pais Ailton e Valma.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo dom da vida e por ter sido minha fortaleza.

Aos meus pais, pelo carinho, paciência e dedicação em todas as etapas de minha vida. Eu amo vocês.

À família, pelo incentivo, apoio e dedicação. Em especial aos tios Romilton Faria e Denise que não mediram esforços para que eu concluísse minha graduação.

À tia Dalva e as primas Daniela e Cristina que sempre estiveram do meu lado.

À minha afilhada Marina, que me deu mais ânimo nesta jornada.

À Universidade Federal de Viçosa, através do Departamento de Engenharia Civil, pela oportunidade de realização do mestrado.

Ao Professor Orientador Carlos Antônio Oliveira Vieira, pela orientação, dedicação ao estudo, incentivo, profissionalismo ético e amizade.

Aos Professores Co-Orientadores Paulo Roberto Antunes Aranha pelos inúmeros trabalhos de campo e Carlos Alexandre Braz de Carvalho pelas contribuições acadêmicas, e ambos pela amizade e incentivo.

Thanks to Timo Saarenketo researcher who was always willing to help us answering all e-mails, sent some of your publications which were base this work and the version of the ROAD DOCTOR software. Thank you so much for your friendship!

Ao professor Edgar Ricardo Ferreira pela dedicação, apoio e ajuda no desenvolvimento dos trabalhos.

Aos professores do Setor de Engenharia de Agrimensura, pelos ensinamentos.

Ao professor Márcio Rocha Francelino por emprestar o GPR da GSSI.

Aos colegas Edneya Gomes da Silva, Leandro Poleto, Julierme Wagner da Penha, Wesley Henrique Godoy, Antônio Prata, pela ajuda nos trabalhos acadêmicos concebidos em equipe.

Aos amigos Pe. João Baptista Adário, Alessandro C. do Nascimento e ao ministério Ruah pelos conselhos, orações e apoio.

Muitos ajudaram nesta caminhada. Perdão às omissões.

BIOGRAFIA

SANDRO HENRIQUE DE FARIA, filho de Ailton Antônio de Faria e Valma Henrique Faria, nasceu em 02 de fevereiro de 1979, na cidade de Alto Jequitibá, Minas Gerais.

Em 1997, ingressou no Curso de Engenharia Civil na Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora - MG, concluindo a graduação no final de 2002.

De 2003 a 2006 prestou serviços de topografia e controles tecnológicos de solos, asfaltos e concretos, pela Exacta Gerenciamento Tecnologia e Topografia LTDA.

De 2006 a 2008 prestou serviços diversos de pavimentação pela JRO Pavimentação LTDA a diversos órgãos públicos e privados dos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo.

Em julho de 2008, ingressou na pós-graduação através do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Área de Concentração: Informações Espaciais. Em nível de mestrado, na Universidade Federal de Viçosa.

Em 2009 prestou serviços de terraplenagem e pavimentação pela construtora ENGETRAN.

De outubro de 2009 a fevereiro 2010 exerceu a função de coordenador e professor do curso de Engenharia Civil da Faculdade do Noroeste de Minas – FINOM.

Desde fevereiro 2010 como professor substituto no departamento de Transportes e Geotecnia na Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xv
RESUMO.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Caracterização do problema	3
1.2 Justificativa.....	4
1.3 Hipótese.....	5
1.4 Objetivos.....	6
1.5 Estruturação da dissertação	6
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	8
2.1 Pavimento a partir do aspecto estrutural e funcional.....	8
2.1.1 Principais tipos de estruturas usados em pavimentos asfálticos	11
2.1.2 Principais tipos de materiais utilizados em pavimentação	14
2.2 GPR (<i>Ground Penetrating RADAR</i>): princípios e funcionamento	19
2.2.1 Princípios da técnica GPR	22
2.2.2 Características elétricas da água nos solos e agregados	34
2.2.2.1 Água higroscópica, água de adsorção ou adesiva.....	36
2.2.2.2 Água Capilar.....	37
2.2.2.3 Água livre ou gravitacional	37
2.2.3 Características elétricas dos solos, agregados, betume e ar.....	38
2.2.3.1 Propriedades elétricas do revestimento	40
2.2.3.2 Propriedades elétricas do revestimento velho	42
2.2.4 Técnicas usadas para medir as propriedades elétricas	42
2.2.4.1 Técnica GPR.....	43
2.2.4.2 Técnica TDR	46
2.2.4.3 Técnica SNA	46
2.2.4.4 Técnica baseada na medida da capacitância.....	47
2.2.5 Peso específico	47
2.3 Aquisição dos dados	51
2.4 Tratamentos dos dados do GPR.....	53
2.4.1 Pré-processamento.....	54
2.4.1.1 Ganhos.....	55
2.4.1.2 Transformação geométrica	55
2.4.2 Realce	55
2.4.2.1 Contraste.....	56

2.4.2.2	Filtros.....	56
2.4.2.2.1	Filtros de frequência.....	57
2.4.2.2.2	Filtro de deconvolução.....	57
2.4.2.2.3	<i>Remove background</i>	58
2.4.3	Análise de imagens.....	58
2.5	Transformada <i>Wavelet</i>	58
2.5.1	Transformada de <i>Wavelets</i> : Contínua (TWC) e Discreta (TWD).	62
2.5.2	Aproximações e Detalhes.....	64
3.	METODOLOGIA.....	65
3.1	Estudo das espessuras das camadas de maneira automatizada.....	65
3.1.1	Caracterização da área de estudo.....	66
3.1.2	Instrumentação e aparelhagem utilizada.....	67
3.1.3	Procedimentos adotados em campo.....	69
3.1.4	Pré-processamento.....	74
3.1.5	Processamento – MCCWFUN.M.....	75
3.1.6	Amostras de treinamento e teste.....	77
3.1.7	Interpolação dos coeficientes <i>Wavelets</i>	79
3.1.8	Processo de redução das variáveis discriminatórias (coeficientes).....	81
3.1.9	MaxVer.....	82
3.2	Estudo do peso específico da camada de revestimento.....	84
3.2.1	Caracterização da área de estudo.....	84
3.2.2	Instrumentação e aparelhagem utilizada.....	85
3.2.3	Trabalho de campo.....	86
3.2.4	Processamento e análise dos dados.....	88
4.	RESULTADOS E DISCUSÕES.....	90
4.1	Identificação automática das camadas que compõem o pavimento.	90
4.2	Determinação do peso específico da camada de revestimento.....	101
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	106
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
	APÊNDICE 1.....	115
	APÊNDICE 2.....	119
	APÊNDICE 3.....	123
	APÊNDICE 4.....	124
	APÊNDICE 5.....	125

LISTA DE SÍMBOLOS

K^*	Permissividade dielétrica relativa, valor dielétrico ou constante dielétrica
K^*_1	Valor da permissividade dielétrica relativa da primeira camada
K^*_2	Valor da permissividade dielétrica relativa da segunda camada
\hat{K}	Índice de exatidão kappa
\hat{K}_{cond}	Índice de exatidão kappa condicional
ω	Frequência angular
ϵ_0	Permissividade dielétrica no vácuo ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m)
ϵ	Permissividade dielétrica complexa
ϵ_a	Constante dielétrica do asfalto
K'	Parte real do valor dielétrico
K''	Fator de perda que é dependente da frequência
iK'''	Parte imaginária do valor dielétrico
E	Campo elétrico
t	Tempo
θ	Ângulo
v	Velocidade de propagação
J_d	Densidade de corrente de deslocamento
σ	Condutividade elétrica
$\tan(\delta)$	Tangente da perda
c	Velocidade da luz no vácuo (0,3 m/ns)
k	Coefficiente de reflexão
R	Coefficiente de penetração
\vec{D}	Deslocamento elétrico
ρ	Densidade de carga livre
\vec{B}	Indução magnética
\vec{H}	Campo magnético
\vec{J}	Densidade de corrente elétrica
\vec{E}	Campo elétrico
A	Atenuação do meio

A_0	Amplitude de reflexão do asfalto medidas de pico a pico
A_m	Amplitude de reflexão da placa de metal medidas de pico a pico
I	Comprimento de onda
α	Constante de atenuação
β	Parâmetro de fase
μ_0	Permissividade magnética no vácuo (4×10^{-7} henries/m)
μ	Permissividade magnética
h	Teor de umidade (%)
P_h	Peso do solo úmido
P_s	Peso do solo seco
ΔC	Variação da capacitância
C_a	Capacitância ativa da sonda
ϵ_r	Permissividade relativa do material
γ_h	Peso específico úmido da amostra
γ_s	Peso específico seco da amostra
V_t	Volume total
V_w	Volume de água
V_a	Volume de ar
V_s	Volume ocupado pelas partículas sólidas
$\psi_{a,b}$	Wavelet primitiva ou mãe

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO	<i>American Association of State Highway Officials</i>
ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
BGS	<i>Brita graduada simples</i>
BGTC	<i>Brita graduada tratada com cimento</i>
CA	<i>Concreto Asfáltico</i>
CBUQ	<i>Concreto Betuminoso Usinado à Quente</i>
CCR	<i>Concreto Compactado a Rolo</i>
CMP	<i>Common Midle Point</i>
CDP	<i>Common Depth Point</i>
CNT	<i>Confederação Nacional do Transporte</i>
DER-SP	<i>Departamento de Estradas de Rodagem do estado de São Paulo</i>
DER-MT	<i>Departamento de Estradas de Rodagem do estado de Mato Grosso</i>
DNER	<i>Departamento Nacional de Estradas de Rodagens</i>
DNIT	<i>Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes</i>
EC	<i>Erro de Comissão</i>
EG	<i>Exatidão Global</i>
EM	<i>Eletromagnético</i>
EO	<i>Erro de Omissão</i>
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
GPR	<i>Ground Penetrating RADAR</i>
GPR-RSAD	<i>Ground Penetrating RADAR - RADAR Surface Arrival Detection</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSSI	<i>Geophysical Survey Systems Inc</i>
ISC	<i>Índice Suporte Califórnia</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
ML	<i>Maximum Likelihood</i>
NBR	<i>Norma Brasileira Regulamentadora</i>
NC	<i>Níveis de cinza</i>
PDI	<i>Processamento Digital de Imagens</i>

PNLT	<i>Plano Nacional de Logística e Transporte</i>
RADAR	<i>Radio Detection And Ranging</i>
SNA	<i>Surface Network Analyzer</i>
SW-TDR	<i>Surface Wave – Time Domain Reflectometry</i>
TDR	<i>Time Domain Reflectometry</i>
TWC	<i>Transformada Wavelet Contínua</i>
TWD	<i>Transformada Wavelet Discreta</i>
WARR	<i>Wide Angle and Refraction</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estrutura típica de um pavimento flexível.....	10
Figura 2. Estrutura típica de um pavimento rígido.	10
Figura 3. Estruturas típicas de pavimentos asfálticos	12
Figura 3. Estruturas típicas de pavimentos asfálticos (cont.).....	13
Figura 3. Estruturas típicas de pavimentos asfálticos (cont.).....	14
Figura 4. Terminologia para Bases e Sub-bases.....	15
Figura 5. Terminologia para Revestimentos	16
Figura 6. Materiais granulares empregados em base, sub-base ou reforço de subleito.	18
Figura 7. Aspecto de uma “ <i>Air-coupled antenna</i> ” dispostas em duas polaridades, sendo calibrada com uma placa de metal.	20
Figura 8. Aspecto de uma antena de contato “ <i>Ground-coupled antenna</i> ” modelo GSSI SIR 3000 – 900 MHz.....	20
Figura 9. Princípio básico da técnica GPR com antena “ <i>horn</i> ” para análise de pavimento	20
Figura 10. Características básicas de funcionamento de uma antena quanto à frequência, velocidade, comprimento de onda, resolução e capacidade de penetração no solo.....	22
Figura 11. Aspecto de um campo eletromagnético polarizado verticalmente. O eixo Z define a direção do campo eletromagnético	23
Figura 12. Lei de Snell - Se $v_1 > v_2$ o ângulo $\theta_1 > \theta_2$ o raio refratado se aproxima da normal. Se $v_1 < v_2$ o ângulo $\theta_1 < \theta_2$ o raio refratado se distancia da normal.	26
Figura 13. Emissão e reflexão de ondas eletromagnéticas nas interfaces do pavimento	30
Figura 14. Relação entre a frequência, atenuação e condutividade	31
Figura 15. Relação entre a frequência, velocidade e condutividade	32
Figura 16. Estrutura de ligação entre a molécula de água e uma partícula sólida	36

Figura 17. Valores dielétricos para quatro tipos de argilas em função da frequência antes e depois de absorver umidade	41
Figura 18. Modelo esquemático que mostra a variação da constante dielétrica em função da idade do pavimento.....	42
Figura 19. Traço de GPR medido a partir de um pavimento novo com uma antena “horn” de 1 GHz e tendo removido o “background”. Os picos A ₁ , A ₂ e A ₃ são as reflexões a partir da superfície do pavimento, base e sub-base respectivamente	45
Figura 20. Curva de compactação com a energia de Proctor normal para diferentes tipos de solos	49
Figura 21. Princípio do efeito da compactação sobre a dieletricidade do pavimento.	50
Figura 22. Modelo de aquisição Normal, afastamento comum ou “off-set” comum.	52
Figura 23. Modelo de aquisição WARR (<i>Wide Angle Reflection and Refraction</i>)....	52
Figura 24. Modelo de aquisição CMP (Ponto Médio Comum) (MELO, 2007).	52
Figura 25. Transiluminação aplicada a uma peça de concreto armado fissurada.	53
Figura 26. Comparação entre a TWC e TWD aplicadas a um sinal	63
Figura 27. Análise de multirresolução.	64
Figura 28. Caracterização da área de estudo: Rodovias BR116 e 040.....	66
Figura 29. Sistema SIR-3000 da GSSI utilizado na aquisição dos dados.....	67
Figura 30. Antena GSSI, modelo 3101A com frequência central de 900 MHz.....	67
Figura 31. Perfil construtivo da faixa 2, Via DUTRA, Pista Sul, km 239+760, extraído a 1 m do início da reconstrução.	69
Figura 32. Aquisição dos dados de GPR na Via DUTRA, Pista Sul, km 239+760... ..	70
Figura 33. Aspecto do “radargrama”, completo, obtido a 30 centímetros da borda da reconstrução	72
Figura 34. Aspecto do “radargrama” obtido a 100 centímetros da borda da reconstrução.	73
Figura 35. (a) radargrama obtido a 30 cm da borda da reconstrução. (b) aspecto do perfil construtivo. (c) Radargrama obtido a 1 m da borda da reconstrução. Dados coletados a 1 metro do início da reconstrução.	74
Figura 36. A imagem a esquerda mostra a imagem no estado bruto (*.DZT) e à direita a imagem na composição de 8bits com o número de linhas múltiplos da dimensão do bloco.....	75

Figura 37. Esquema da rotina “ <i>mccwfun.m</i> ” para bloco 10x10.....	76
Figura 38. Esquema de funcionamento da rotina “ <i>Escolhe Arquivos</i> ”.....	78
Figura 39. Interface da rotina “ <i>Escolhe Arquivos</i> ”.....	78
Figura 40. Superfície gerada pelo interpolador “ <i>Collocation</i> ”.....	81
Figura 41. Aspecto do local de estudo: BR040, km 470, Pista Sul.....	85
Figura 42. Sistema RAMAC desenvolvido pela MALA <i>Geoscience</i>	85
Figura 43. Antena <i>Shielded HF</i> da MALA com frequência central de 1,6 GHz.....	85
Figura 44. Sistema de GPR com suporte para a antena.....	87
Figura 45. Passos para a obtenção dos resultados usando a técnica da reflexão.....	88
Figura 46. Aspecto do traço obtido com o CBUQ solto e com a placa metálica.....	89
Figura 47. Imagem temática para os coeficientes diagonal da imagem obtida a 30 cm da borda da reconstrução, bloco 4x4.....	97
Figura 48. Imagem temática para os coeficientes horizontal da imagem obtida a 30 cm da borda da reconstrução, bloco 4x4.....	97
Figura 49. Imagem temática para os coeficientes vertical da imagem obtida a 30 cm da borda da reconstrução, bloco 4x4.....	97
Figura 50. Imagem temática para os coeficientes diagonal da imagem obtida a 1 metro da borda da reconstrução, bloco 4x4.....	98
Figura 51. Imagem temática para os coeficientes horizontal da imagem obtida a 1 metro da borda da reconstrução, bloco 4x4.....	98
Figura 52. Imagem temática obtida para os coeficientes vertical da imagem obtida a 1 metro da borda da reconstrução, bloco 4x4.....	98
Figura 53. Imagem temática obtida para os coeficientes diagonal da imagem obtida a 30 cm da borda da reconstrução, bloco 10x10.....	99
Figura 54. Imagem temática obtida para os coeficientes horizontal da imagem obtida a 30 cm da borda da reconstrução, bloco 10x10.....	99
Figura 55. Imagem temática obtida para os coeficientes Vertical da imagem obtida a 30 cm da borda da reconstrução, bloco 10x10.....	99
Figura 56. Imagem temática obtida para os coeficientes diagonal da imagem obtida a 1 metro da borda da reconstrução, bloco 10x10.....	100
Figura 57. Imagem temática obtida para os coeficientes horizontal da imagem obtida a 1 metro da borda da reconstrução, bloco 10x10.....	100

- Figura 58. Imagem temática obtida para os coeficientes vertical da imagem obtida a 1 metro da borda da reconstrução, bloco 10x10..... 100
- Figura 59. Correlação entre o peso específico e o valor dielétrico. 103
- Figura 60. “Radargramas” obtidos no bordo esquerdo sentido Brasília – BH. (a) “radargrama” obtido para o CBUQ no estado solto e sem a placa metálica. (b) “radargrama” obtido para o CBUQ no estado solto e com a placa metálica. (c) “radargrama” obtido com o CBUQ no estado compactado e sem a placa metálica. (d) “radargrama” obtido com o CBUQ no estado compactado e com a placa metálica..... 104
- Figura 61. “Radargramas” obtidos no bordo direito sentido Brasília - BH. (a) “radargrama” obtido com o CBUQ no estado solto e sem a placa metálica. (b) “radargrama” obtido para o CBUQ no estado solto e com a placa metálica. (c) “radargrama” obtido para o CBUQ no estado compactado e sem a placa metálica. (d) “radargrama” obtido com o CBUQ no estado compactado e com a placa metálica..... 105
- Figura 62. Superfícies geradas pelo interpolador *Collocation* para a imagem extraída a 30cm da borda da reconstrução, para os coeficientes diagonal, horizontal e vertical utilizando bloco 4x4..... 123
- Figura 63. Superfícies geradas pelo interpolador *Collocation* para a imagem extraída a 30 cm da borda da reconstrução, para os coeficientes diagonal, horizontal e vertical utilizando bloco 10x10..... 124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades eletromagnéticas típicas de alguns materiais.....	39
Tabela 2. Constante dielétrica de alguns materiais mais comumente utilizados em rodovias	40
Tabela 3. Espessuras medidas com a trena.	70
Tabela 4. Índice do coeficiente Kappa e o correspondente conceito do desempenho da classificação.....	84
Tabela 5. Matriz de Erros para os coeficientes diagonal, horizontal e vertical da imagem obtida a 30 cm da borda da reconstrução, usando bloco 4x4 pixels.	91
Tabela 6. Matriz confusão para os coeficientes diagonal, horizontal e vertical da imagem obtida a 1 metro da borda da reconstrução, usando bloco 4x4 pixels.	92
Tabela 7. Matriz confusão obtida para os coeficientes diagonal, horizontal e vertical da imagem obtida a 30 cm da borda da reconstrução, usando bloco 10x10 pixels.	93
Tabela 8. Matriz confusão obtida para os coeficientes diagonal, horizontal e vertical da imagem obtida a 1 metro da borda da reconstrução, usando bloco 10x10 pixels.	94
Tabela 9. Valores dielétricos para o bordo esquerdo do local de estudo.	101
Tabela 10. Valores dielétricos para o bordo direito do local de estudo.	101
Tabela 11. Dados de laboratório para os pontos ensaiados.....	102

RESUMO

FARIA, Sandro Henrique de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2010.

O uso do Georadar na determinação de parâmetros da estrutura de pavimentos flexíveis. Orientador: Carlos Antônio Oliveira Vieira. Co-orientadores: Paulo Roberto Antunes Aranha e Carlos Alexandre Braz de Carvalho.

Este trabalho tem o propósito de analisar o desempenho do RADAR de penetração no solo como ferramenta na determinação das espessuras das camadas do pavimento rodoviário flexível de maneira automática e a densidade da camada de revestimento apoiado em testes integrados de GPR e dados geotécnicos. O primeiro experimento foi realizado na rodovia Presidente Dutra (BR116), município de Piraí - RJ, em quanto os dados para o segundo experimento foram obtidos na rodovia BR040, município de Sete Lagoas - MG. Para atingir os objetivos do trabalho foram elaboradas duas metodologias: a primeira delas, direcionada à identificação das espessuras das camadas de pavimentos flexíveis de modo automatizado; a segunda, voltada para a determinação da densidade da camada de revestimento asfáltico. A primeira metodologia apresentou, de uma maneira geral, resultados promissores, uma vez que foram bons os resultados de classificação para as classes 1 (off-set) e 3 (macadame), no entanto, houve confusão entre os “blocos” classificados para as classes 2 (revestimento) e 4 (subleito). Uma possível alternativa para a melhoria dos resultados seria mudar o extrator de textura utilizado (*transformada wavelet*), valeria apenas testar outros extratores da família *wavelet*; outra opção seria utilizar outro tipo de interpolador, usando um que pegue mais as tendências dos coeficientes ao se gerar a superfície; também seria interessante aumentar o número de amostras de treinamento e teste, ou até mesmo, utilizar outro tipo de classificador, como por exemplo, Redes Neurais Artificiais. Todavia, esse é um campo que vale ser pesquisado mais profundamente, uma vez que os resultados alcançados se mostraram esperançosos. A segunda metodologia, referente à correlação da densidade da camada de revestimento através do valor dielétrico, medido por meio de uma antena de contato no solo, de 1,6 GHz, utilizando a técnica da reflexão, apresentou valores satisfatórios apesar dos poucos pontos amostrados, mostrando ser uma boa escolha para se determinar a densidade da camada de revestimento de maneira indireta e para trabalhos futuros na área.

ABSTRACT

FARIA, Sandro Henrique de, M.Sc., Federal University of Viçosa, June of 2010.

The use of Ground Penetrating Radar in the determination of the structure of flexible pavements. Advisor: Carlos Antonio Oliveira Vieira. Co-advisors: Paulo Roberto Antunes Aranha and Carlos Alexandre Braz de Carvalho

This paper aims to analyze the Ground Penetrating RADAR as tool in the determination of the thickness of the layers of the flexible road pavement of automatic way and the density of the asphalt layer supported by integrated testing of GPR and geotechnical data. The first experiment was conducted at the Presidente Dutra highway (BR116), Pirai - RJ, while the data for the second experiment were obtained from the BR040 highway, Sete Lagoas - MG. In order to achieve the objectives of this study, two methodologies were developed: the first one, directed to the identification of the thicknesses of the layers of flexible pavements of automated way; the second one, focused on determining the density of the layer of asphalt surfaces. The first methodology showed promising results, once it presented good classification results for the classes 1 (off-set) and 3 (macadam), however, was confusion between the "blocks" classified for the classes 2 (asphalt) and 4 (sub-grade). A possible alternative, for improvement, would be: to use other texture extractor of the wavelet transform family; to use another type of interpolation, using a that better represents the trends of the coefficients to be generated the surface; to increase the number of training and testing samples, or even to use another type of classifier, such as Artificial Neural Networks. However, this is a field that is worth being investigated more deeply, since the results proved to be significant. The second methodology, regarding the correlation of the density of the asphalt layer through the dielectric value, measured by means an ground coupled antenna, of 1,6GHz, using the technique of the reflection, it presented satisfactory values in spite of the few sampling points, showing to be a good alternative to determine indirectly the density of the asphalt layer and for future works in the area.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico, político e social de um país estão diretamente ligados aos seus Sistemas de Transporte. Nesses Sistemas, o modal rodoviário, por meio de suas rodovias, é fundamental para o acesso de produtos e passageiros aos principais pontos de coleta e distribuição, garantindo, assim, a integração entre portos, ferrovias, hidrovias e aeroportos.

Em virtude das características territoriais brasileiras e da necessidade de concretização de seu desenvolvimento econômico, é fundamental para o Brasil conservar e ampliar a atual malha rodoviária, de forma a garantir o aumento do nível de serviço do transporte, bem como a redução dos índices de acidentes. Para isso, tornam-se necessários investimentos em novas metodologias para avaliação das rodovias, que sejam mais céleres, eficazes e menos dispendiosas.

No entanto, alguns métodos tradicionais utilizados hoje em dia para o controle tecnológico em rodovias, tanto em construção quanto para manutenção, tais como: o *Coring*, *Frasco de Areia* e *Hilf* são métodos destrutivos, dispendiosos e morosos.

No *Coring* é feita uma sondagem no pavimento com a utilização de brocas e como resultado obtém-se um testemunho¹ com o qual é possível determinar as espessuras das camadas do revestimento e posterior obtenção do peso específico da camada de asfalto pelo método de *deslocamento de volume*.

Os métodos *Frasco de Areia* e *Hilf* são utilizados apenas para a determinação de pesos específicos em materiais friáveis². O primeiro pode ser usado em todas as camadas do pavimento, com exceção do revestimento e o segundo apenas em materiais siltosos e/ou argilosos.

Dentro desta ótica, surge a necessidade de técnicas e meios mais rápidos e baratos para suprir a demanda necessária para a manutenção das rodovias brasileiras.

¹ Amostra indeformada da camada do revestimento asfáltico.

² Materiais que podem ser reduzidos a fragmentos ou a pó com facilidade.

A ferramenta GPR (*Ground Penetrating RADAR*), cujo princípio foi descoberto por Heinrich Hertz na década de 1880, surge como uma alternativa inovadora e promissora para a utilização em rodovias.

O GPR (*Ground Penetrating RADAR*) é uma ferramenta não invasiva, contínua e de alta velocidade na coleta de dados e que tem sido usada para mapear as condições da sub-superfície em uma vasta variedade de aplicações (CAO *et al.*, 2007; ANNAN A. P., 1992; KNOLL e KNIGHT, 1994; SAARENKETO, 2006; LOIZOS e PLATI, 2007). No entanto, essa ferramenta possui uma história relativamente recente. O primeiro RADAR especificamente para a penetração no solo foi desenvolvido pelo MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) para que o exército americano pudesse detectar as galerias subterrâneas construídas no Vietnã pelos inimigos (CAO *et al.*, 2007).

Em 1974, foi emitida a primeira patente de GPR. Desde então essa tecnologia vem desenvolvendo-se continuamente, o que tem permitido estudos no solo que se estende a sub-superfície e com possibilidades de uso para o estudo e análise das estruturas de pavimentos como: revestimento asfáltico, base, sub-base, reforço de subleito (CAO *et al.*, 2007). Estas aplicações apresentam um campo de estudo interessante e competitivo em relação a outros métodos de prospecção tradicionais na área de pavimentação, como a sondagem a trado, por exemplo.

A técnica GPR oferece uma nova forma de investigação de condições geológicas e geotécnicas rasas, diferentes dos procedimentos usuais (AGUIAR, 2005), onde os métodos utilizados são destrutivos, ou seja, faz-se a extração de corpos-de-provas, fazendo com que esta metodologia seja vagarosa e onerosa.

O GPR produz uma onda eletromagnética de alta frequência que é transmitida ao solo, onde a propagação do sinal é dependente das propriedades elétricas dos materiais que constituem o solo (AGUIAR, 2005). As mudanças nas propriedades elétricas do meio fazem com que parte do sinal transmitido seja refletido de volta. O sinal refletido é detectado pela unidade receptora do sistema GPR onde é amplificado, digitalizado, armazenado, processado e convertido em imagem chamada de radargrama.

A maioria dos sistemas pode operar em várias frequências dependendo da utilização. Hoje as antenas comercializadas pelos fabricantes trabalham com uma frequência central que varia de 10 a 2600 MHz.

Os fenômenos mais importantes nestes estudos de reflexão em descontinuidades eletromagnéticas do subsolo são basicamente quatro: os que afetam a resolução; os que limitam a penetração da energia no meio (atenuação, dispersão); os que determinam o percentual de energia refletida e transmitida em cada um dos contatos; e os que determinam a velocidade de propagação da onda em cada material (AGUIAR, 2005). Ou seja, os parâmetros que influenciam na velocidade de penetração das ondas de RADAR no meio são: a permissividade relativa, a condutividade, a permeabilidade magnética e a frequência da emissão. Os três primeiros são característicos dos componentes do meio, enquanto que o quarto depende do equipamento utilizado.

Apesar da disponibilidade de radargramas de superfícies pavimentadas, estudos da sua interpretação automática, no que diz respeito às espessuras das camadas que compõem o pavimento determinadas pelo GPR, é ainda bastante incipiente. Também não existem muitos estudos utilizando GPR para a determinação do peso específico dessas camadas.

1.1 Caracterização do problema

A maior parte das principais rodovias do país está em situação deficiente, ruim ou péssima, conforme mostrou uma pesquisa da *Confederação Nacional do Transporte* (CNT) de 2007 onde se avaliaram 87.592 km de rodovias em todo país (CNT, 2007).

Da extensão total pesquisada, 26,1% (22.893 km) foram avaliadas positivamente, contra 73,9% (64.699 km) apresentando algum tipo de deficiência. A CNT informa também que 54,5% (47.777 km) da malha rodoviária pesquisada se encontram com o pavimento em estado regular, ruim ou péssimo; 65,4% (57.253 km) da extensão pesquisada apresentam sinalização com problemas; 8,5% (7.462 km) da extensão avaliada possuem placas total ou parcialmente cobertas pelo mato; 39,0% (31.880 km) da extensão avaliada possuem placas com a legibilidade deteriorada e

37,5% (32.815 km) da extensão pesquisada não possuem placas de limite de velocidade (PNLT, 2007).

O Brasil é um país carente em rodovias e a maior parte, do pouco que existe, está em péssimas condições de tráfego, prejudicando o transporte de cargas e pessoas (PNLT, 2007). Apesar disso, segundo o *Plano Nacional de Logística e Transporte* (PNLT), coordenado conjuntamente pelo Ministério dos Transportes e pelo Ministério da Defesa, o transporte rodoviário de carga corresponde, atualmente, por 58% do total realizado por rodovias. A elevada participação do modal rodoviário em sua matriz de transportes leva a categorizar o Brasil como um país “rodoviarista” (PNLT, 2007).

A fragilidade de nossa infraestrutura rodoviária se traduz numa série de fatos negativos: a elevação do tempo de transporte, os altos índices de acidentes, o encarecimento do custo das atividades econômicas, a perda de competitividade internacional, a redução no nível de emprego e na arrecadação de impostos, a queda da receita de exportações, dentre outros.

No entanto, uma das maneiras que se tem para melhorar as condições das rodovias brasileiras consistiria na realização de uma avaliação periódica da mesma, o que proveria subsídios para se tomar as devidas medidas cabíveis para a sua manutenção, o que seria menos oneroso e mais seguro para os usuários, uma vez que se teriam sempre rodovias em boas condições de uso. Como citados anteriormente, os métodos que vêm sendo utilizados para avaliação das condições das rodovias brasileiras são lentos, destrutivos e caros, o que justifica a necessidade de se pesquisarem outras tecnologias mais rápidas e baratas para tal fim.

1.2 Justificativa

Os métodos convencionais de avaliação das sub-camadas de uma rodovia são métodos destrutivos, dispendiosos e morosos. A técnica do RADAR de penetração no solo é um método indireto e muito mais rápido que os métodos convencionais existentes e que vem demonstrando ser uma ferramenta com potencial na obtenção de informações no estudo de rodovias. Estudos estes desenvolvidos por diversos autores (ABDULLAH *et al.*, 2008; AGUIAR, 2005; AMER-YAHIA e

MAJIDZADEH, 2006; GONÇALVES e CERATTI, 1998; SAARENKETO, 2006). O método permite o mapeamento das camadas que constituem a estrutura do pavimento, de forma contínua e com alta resolução vertical para altas frequências. A imagem obtida é denominada radargrama e constitui a base para construção do perfil constitutivo do pavimento existente.

Os modelos de GPR podem ser utilizados de duas maneiras: sem contato e com contato no solo. Os modelos sem contato podem operar a uma velocidade de até 80 km/h, fazendo com que o trabalho de campo seja realizado sem a interdição de faixas de tráfego, proporcionando uma maior segurança dos usuários. Por outro lado, os modelos de antenas de contato (*Ground Coupled Antennas*) operam em baixas velocidades, pois são arrastadas por um operador.

O GPR tem um grande potencial para ser utilizado na pavimentação e com uma variedade de aplicações, incluindo:

- Detectar drenos existentes;
- Detectar locais de umidade excessiva;
- Detectar redes pluviais ao longo da rodovia;
- Estudo do peso específico da camada de asfalto;
- Medir a espessura do revestimento asfáltico, base e sub-base;

Deve ser ressaltado que esse método, como todo e qualquer método geofísico, depende dos contrastes entre as diferentes regiões contíguas da sub-superfície, além disso, como método indireto, ele depende basicamente da experiência do profissional e da utilização de métodos diretos para confirmação de resultados (AGUIAR, 2005).

1.3 Hipótese

O estudo se baseia em duas hipóteses:

- É possível utilizar uma metodologia indireta para a determinação das espessuras das camadas constituintes do pavimento, pela análise textural de radargramas obtidos pelo método GPR, de maneira automatizada.

- As antenas de contato são capazes de fornecer resultados satisfatórios para a determinação do peso específico da camada de revestimentos asfálticos.

1.4 Objetivos

O objetivo geral deste estudo é a utilização do GPR na determinação automatizada das espessuras das camadas que constituem o pavimento de trechos da Rodovia BR 116, denominada Rodovia Presidente Dutra no município de Piraí-RJ e a correlação do peso específico com o valor dielétrico da camada de revestimento da BR 040, no município de Sete Lagoas – MG altura do km 470.

Para atingir o objetivo geral elaboraram-se os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar a propagação de ondas de RADAR em diferentes meios materiais;
- Descrever e caracterizar a instrumentação e equipamentos de GPR vinculado aos fundamentos de prospecção geofísica;
- Estudar os métodos de aquisição e tratamento de dados por GPR de acordo com as propriedades e características dos meios;
- Desenvolver uma metodologia para o mapeamento das espessuras das camadas;
- Desenvolver uma metodologia para a obtenção dos pesos específicos da camada de revestimento usando Antenas de contato com o solo.

1.5 Estruturação da dissertação

Além desta parte introdutória, que caracteriza o objeto de estudo, a dissertação está organizada em tópicos conforme a descrição abaixo.

Na seção 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre assuntos importantes que sustentam o estudo:

- Propriedades e características dos materiais que compõem o pavimento;
- Conceitos e fundamentos de prospecção geotécnica com GPR;
- Propriedades elétricas de materiais que constituem o pavimento;
- Técnicas usadas para medir constantes dielétricas;

- Peso específico de materiais;
- Tratamentos dos dados do GPR;
- Transformada *Wavelet*.

Na seção 3, são descritos os trabalhos de campo realizados, tais como:

- Instrumentação e aparelhagem utilizada;
- Caracterização da área de estudo;
- Metodologia empregada na obtenção dos resultados.

Na seção 4:

- Apresentação dos resultados;
- Discussão dos Resultados;

Na seção 5:

- Conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão apresentados aspectos estruturais e funcionais de um pavimento flexível, abordando principalmente os principais tipos de estruturas construtivas encontradas no Brasil e os materiais mais comumente utilizados para a confecção das camadas de sub-base, base e revestimento.

2.1 Pavimento a partir do aspecto estrutural e funcional

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BERNUCCI, *et al.*, 2008).

O pavimento é uma estrutura constituída por diversas camadas superpostas, construída sobre o subleito, destinada a resistir simultaneamente a esforços horizontais e verticais, bem como melhorar as condições de segurança e conforto do tráfego de veículos (DER/SP, 2006a).

O comportamento estrutural depende da espessura de cada uma das camadas, da rigidez destas e do subleito, bem como da interação entre as diferentes camadas do pavimento (BERNUCCI, *et al.*, 2008).

Tradicionalmente, os pavimentos utilizados em rodovias se dividem em dois tipos básicos: *Flexível*, também chamado de *pavimentos asfálticos* e *Rígido*, denominado *pavimento de concreto de cimento portland* ou *concreto cimento*.

Os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos e são formados por quatro camadas principais: capa de rolamento ou revestimento

asfáltico³, base⁴, sub-base⁵ e reforço do subleito⁶. O revestimento asfáltico pode ser composto por camada de rolamento que está em contato direto com as rodas dos veículos e por camadas intermediárias, como por exemplo: o *Binder*⁷ que é usado para melhorar a resistência do revestimento, por se tratar de uma mistura com a granulometria mais aberta, melhorando assim o ângulo de atrito entre as partículas. Dependendo do tráfego e dos materiais disponíveis, pode-se ter ausência de algumas camadas. Estas camadas que constituem todo o pavimento repousam sobre o subleito, ou seja, a plataforma da estrada terminada após a conclusão dos cortes e aterros. A Figura 1 apresenta uma estrutura típica de um pavimento flexível.

Pavimentos rígidos são aqueles em que o revestimento é construído por ligantes de cimento. Nestes pavimentos, a espessura é fixada em função da resistência à flexão das lajes de concreto (BAPTISTA, 1976). No entanto, as placas de concreto podem ser armadas ou não com barras de aço. Na Figura 2 pode-se observar uma estrutura típica de um pavimento rígido.

É comum chamar a subcamada dos pavimentos rígidos como sub-base, tendo em vista que a qualidade do material que é utilizado nessa camada equipara-se à camada de sub-base de pavimentos asfálticos.

³ “Camada situada sobre a base, formando a superfície de rolamento de veículos. Poderá ser constituído por tratamento superficial, “*binder*” e concreto asfáltico, ou somente por concreto asfáltico” (DER/SP, 2006a).

⁴ “Camada situada logo acima da sub-base. Poderá ser constituída por materiais granulares, como pedregulhos, cascalhos e produtos de britagem, estabilizados com a adição de cimento ou material betuminoso, quando necessário, solos estabilizados mecanicamente mediante mistura com produtos de britagem, cimento, cal ou materiais betuminosos” (DER/SP, 2006a).

⁵ “Camada requerida por imposição técnico-econômica, situada entre o subleito ou reforço do subleito e a base. Poderá ser constituída por materiais granulares graúdos, como pedregulhos, cascalhos, produtos de britagem que, embora selecionados, não atendem a todos as requisitos necessários à constituição de base do pavimento; solos estabilizados mecanicamente com cimento, cal, ou simplesmente por material selecionado de empréstimo ou jazida” (DER/SP, 2006a).

⁶ “Camada requerida por imposição técnico-econômica, situada imediatamente acima do subleito. Será constituída basicamente por material de empréstimo ou jazida” (DER/SP, 2006a).

⁷ “Camada situada entre a base e a capa de rolamento, utilizada nos casos em que a espessura requerida para o revestimento seja elevada” (DER/SP, 2006a).

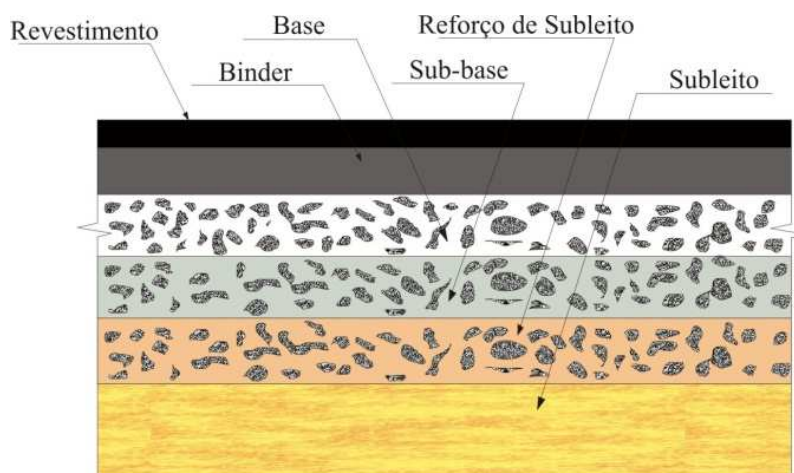


Figura 1. Estrutura típica de um pavimento flexível.

O revestimento asfáltico possui a finalidade de impermeabilizar o pavimento, melhorar as condições de rolamento fornecendo ao usuário maior segurança e conforto, e resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores: base, sub-base, reforço de subleito e subleito.

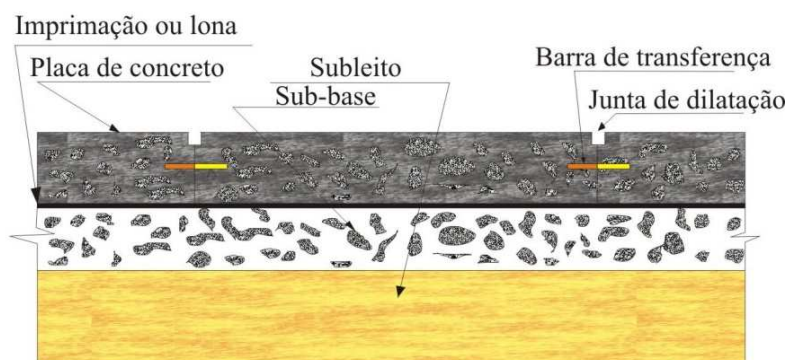


Figura 2. Estrutura típica de um pavimento rígido.

É importante lembrar que diversas fontes (DER/SP, 2006b; DNIT, 2006) têm empregado a terminologia de pavimentos semi-rígidos para aqueles com revestimentos asfálticos que possuam materiais cimentados. Devido ao aumento da rigidez e do módulo de elasticidade eles são capazes de absorver os esforços a tração a que são submetidos.

Nos pavimentos rígidos, ou seja, construídos com concreto de cimento Portland, as cargas de superfície são distribuídas em uma grande área em relação à área de contato do pneu com o pavimento por causa de sua rigidez, suavizando dessa forma as tensões transmitidas às camadas subjacentes. Como os pavimentos asfálticos possuem uma rigidez menor que a do revestimento rígido, as cargas de

superfície são distribuídas numa área mais restrita, ou seja, mais pontual. Por este motivo, ao se dimensionar um pavimento rígido, será encontrada uma espessura, para o pavimento, inferior ao que se encontraria para um pavimento flexível, levando em consideração os mesmos fatores de dimensionamento.

A mecânica dos pavimentos é a disciplina da engenharia civil que trata dessa forma de entendimento do pavimento como um sistema em camadas no qual devem estar compatibilizadas as tensões e deslocamentos solicitantes com as propriedades dos materiais e espessuras das camadas. Esses conceitos devem ser utilizados no dimensionamento da estrutura e condicionam a escolha dos materiais (MEDINA e MOTTA, 2005).

2.1.1 Principais tipos de estruturas usados em pavimentos asfálticos

Esta seção tem finalidade de apresentar algumas soluções típicas de combinações de alguns tipos de materiais e de camadas que vêm sendo utilizadas na pavimentação asfáltica no Brasil.

Serão apresentadas algumas seções de estruturas de pavimento com a finalidade de ilustração, tanto para tráfego muito pesado como para vias de baixo volume de tráfego. Não serão apresentadas as espessuras das camadas que constituem o pavimento, pois as mesmas dependem de dimensionamento estrutural que deve ser feito caso a caso o que foge ao escopo desta dissertação. Ver Figura 3.

No dimensionamento de um pavimento deve ser empregado de preferência um método de dimensionamento que considere a estrutura do pavimento como um sistema de camadas, e que utiliza os dados de módulos de resiliência dos materiais do subleito e das camadas, inclusive do revestimento, para calcular as espessuras necessárias em função do tráfego e do clima (BERNUCCI, *et al.*, 2008).

Para maiores informações sobre métodos de dimensionamento pode-se consultar o *Manual de Pavimentação* do DNIT (DNIT, 2006).

Para ilustrar faixas usuais, as espessuras dos revestimentos vão desde alguns milímetros, como os tratamentos superficiais simples, até uma a duas dezenas de

centímetros de misturas usinadas; as camadas de base e sub-base podem apresentar espessuras da ordem de uma a três dezenas de centímetros, enquanto o reforço do subleito pode ser de uma a três ou mesmo quatro dezenas de centímetros (BERNUCCI, *et al.*, 2008). A Figura 3 apresenta os principais tipos de estruturas de pavimentos usadas.

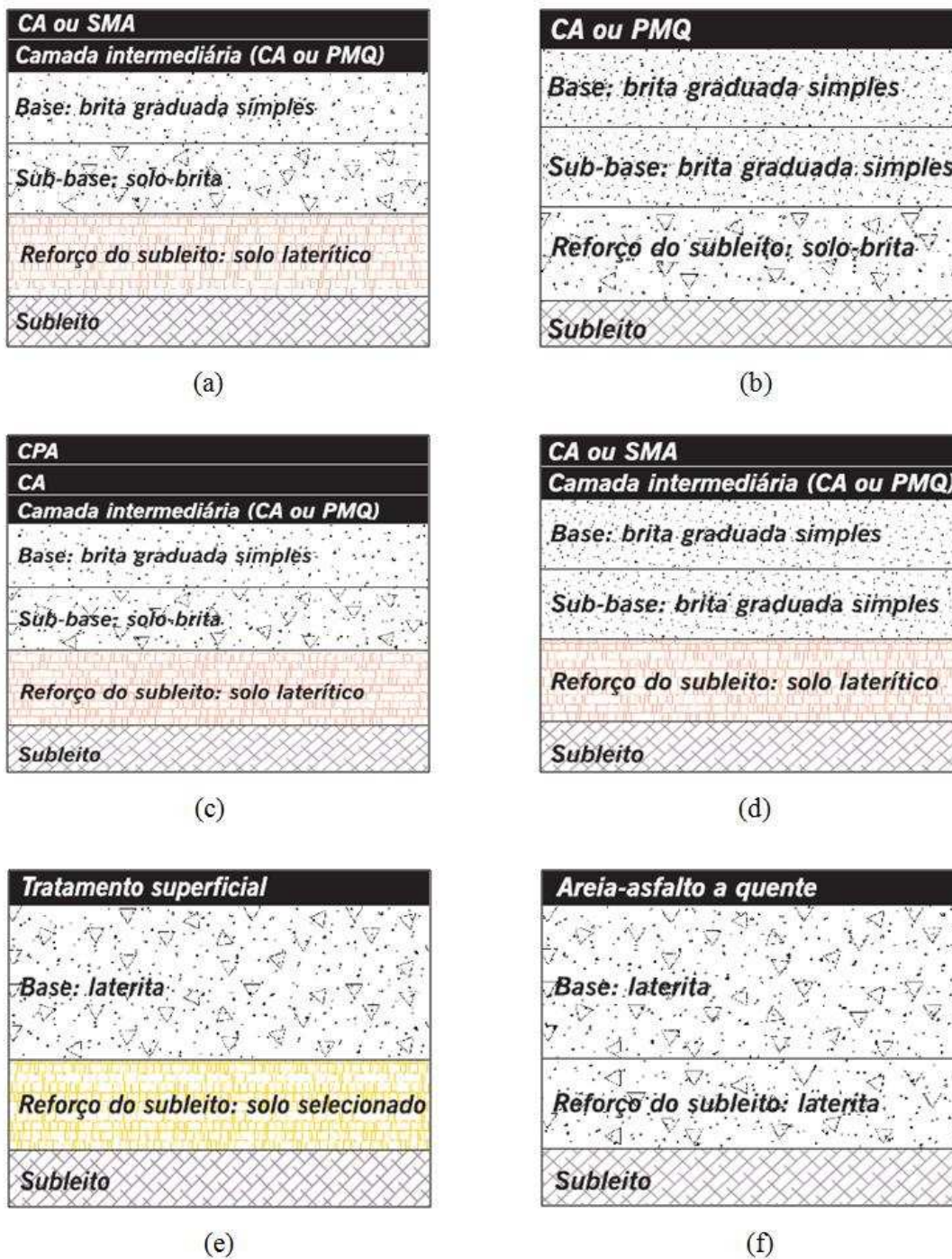
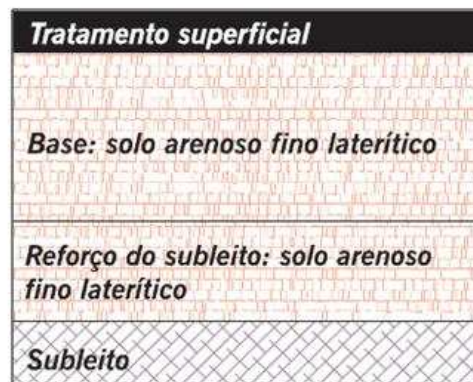


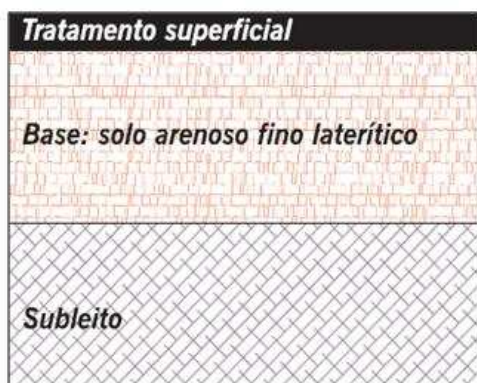
Figura 3. Estruturas típicas de pavimentos asfálticos (BERNUCCI, *et al.*, 2008).



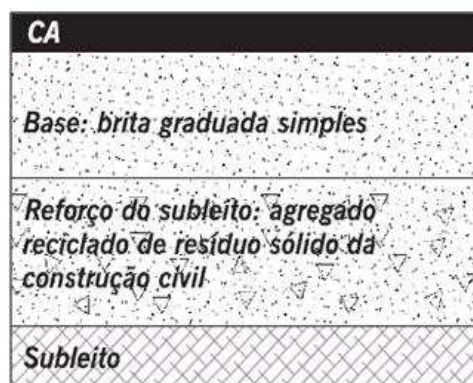
(g)



(h)



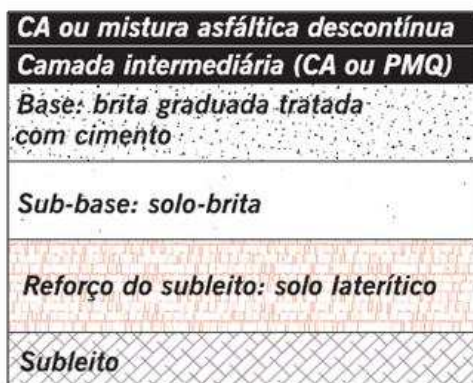
(i)



(j)



(k)



(l)

Figura 3. Estruturas típicas de pavimentos asfálticos (BERNUCCI, *et al.*, 2008)
(cont.).

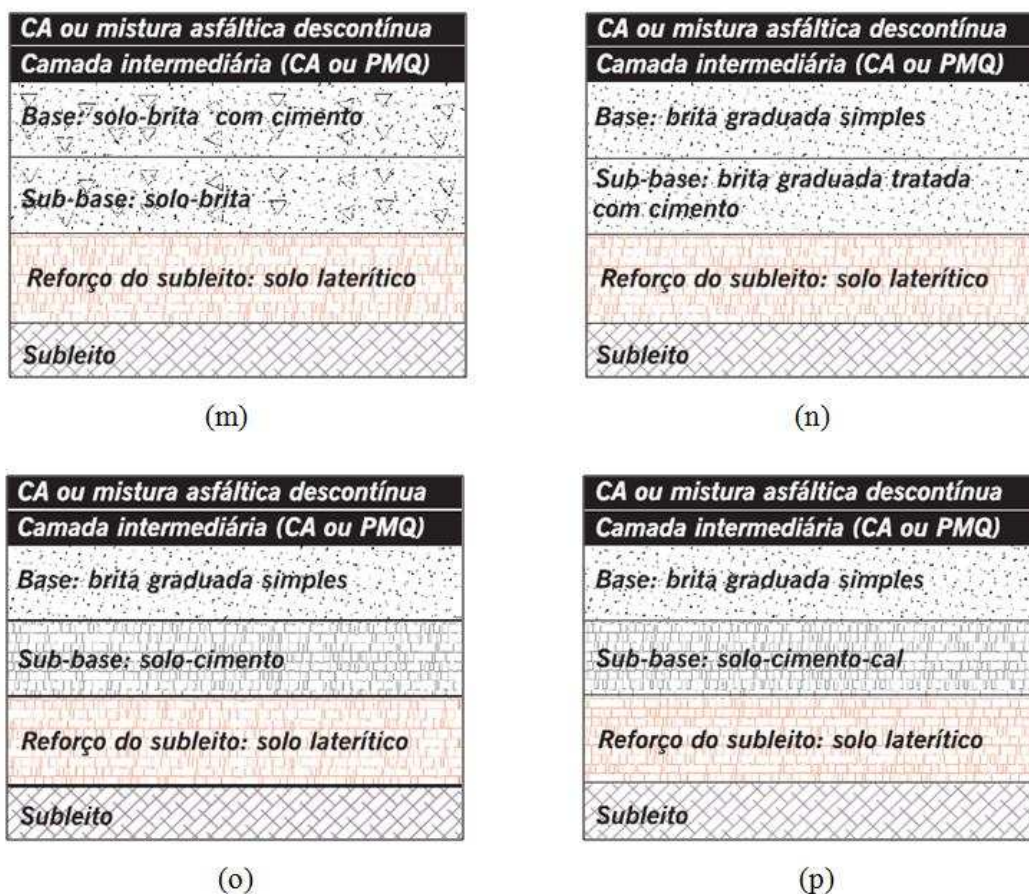


Figura 3. Estruturas típicas de pavimentos asfálticos (BERNUCCI, *et al.*, 2008) (cont.).

É importante lembrar, que uma ou mais camadas que constituem o pavimento podem ser suprimidas dependendo do volume de tráfego, da capacidade de suporte do subleito, da rigidez e espessura das camadas, e das condições ambientais. Estas são informações importantes e que são levadas em consideração no dimensionamento da rodovia.

2.1.2 Principais tipos de materiais utilizados em pavimentação

Neste item, o objetivo é apresentar, de forma sucinta alguns materiais de uso corrente no país que podem constituir as camadas de base, sub-base e reforço do subleito de pavimentos com revestimentos asfálticos. As especificidades e os métodos construtivos de cada um deles devem ser pesquisados nas normas rodoviárias brasileiras do DNER (*Departamento Nacional de Estradas de Rodagens*) atualmente DNIT (*Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes*) ou na ABNT. A Figura 4 apresenta uma classificação para bases e sub-bases citada por

Baptista (1976) e a Figura 5 uma classificação para revestimentos citada por Marques (2008). Informações mais detalhadas são encontradas nas fontes citadas.

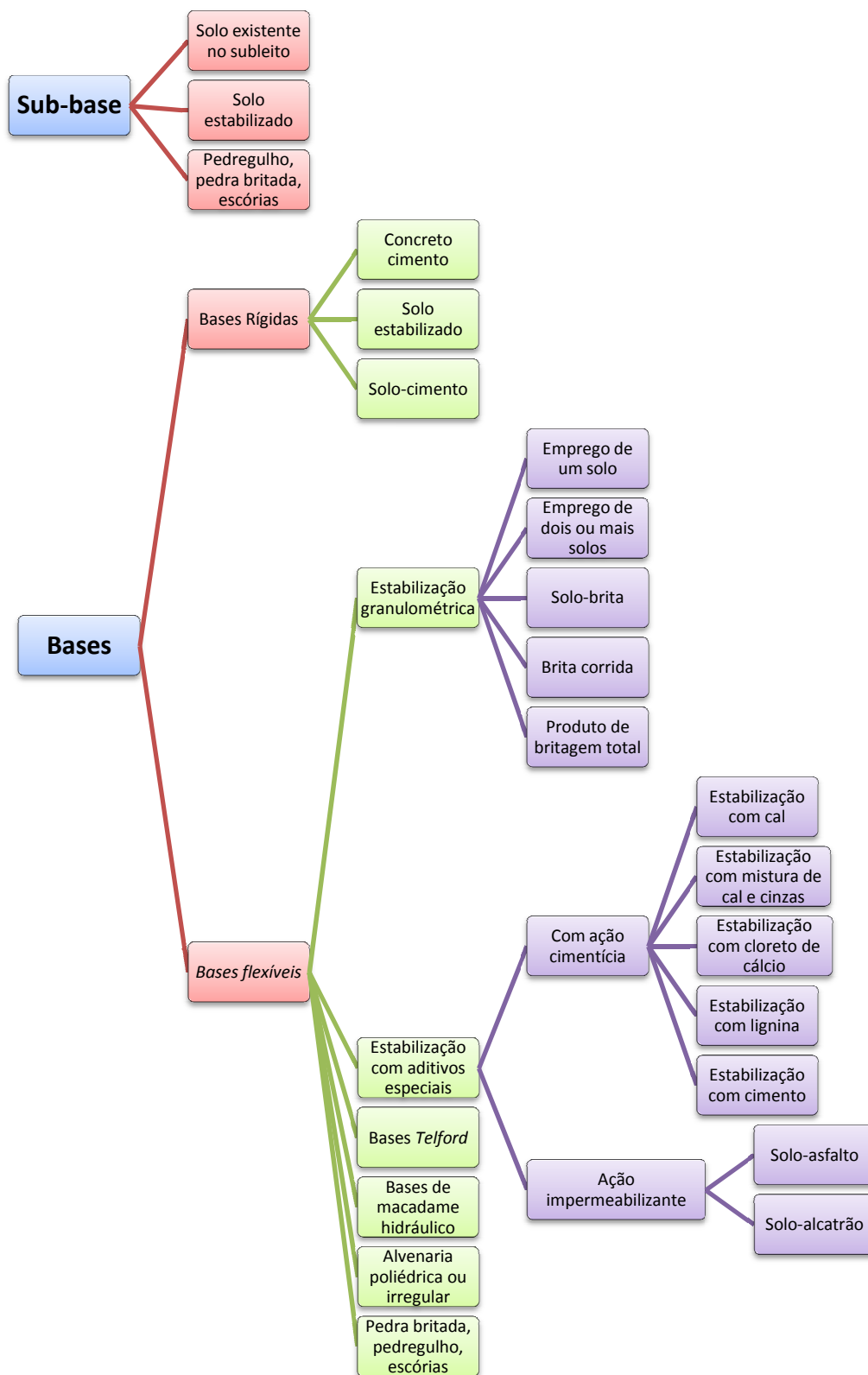


Figura 4. Terminologia para Bases e Sub-bases (BAPTISTA, 1976).

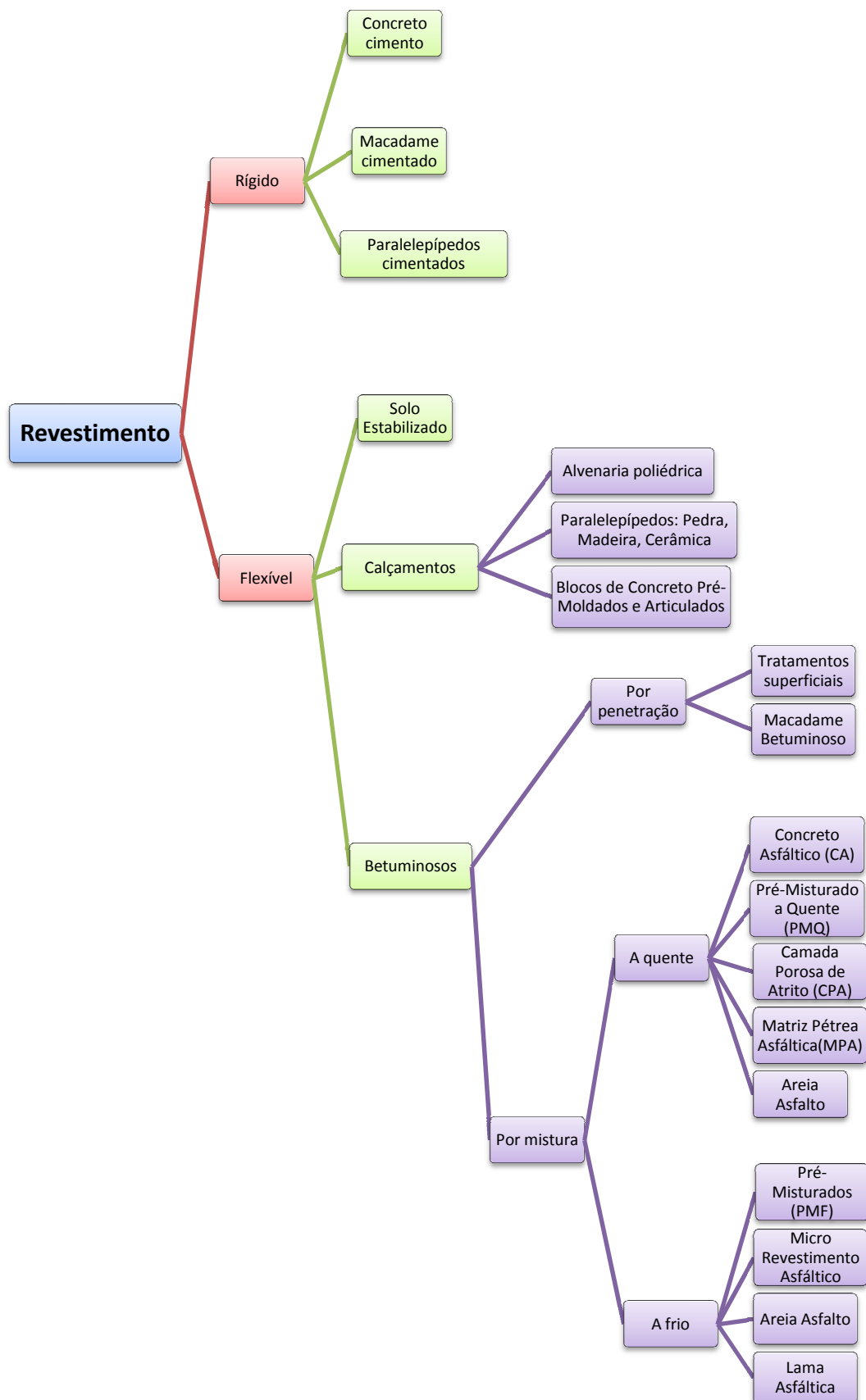


Figura 5. Terminologia para Revestimentos (MARQUES, 2008).

Os materiais de base, sub-base e reforço do subleito são ainda classificados segundo seu comportamento frente aos esforços em: materiais granulares e solos, materiais estabilizados quimicamente ou cimentados, e materiais asfálticos (BERNUCCI, *et al.*, 2008).

Os materiais *granulares* são aqueles que não possuem coesão, ou seja, não resistem aos esforços de cisalhamento e/ou tração, trabalhando bem aos esforços de compressão por possuírem uma maior parcela de ângulo de atrito. Os solos coesivos resistem principalmente à compressão, mas também resistem aos esforços de cisalhamento e/ou tração de pequena intensidade, devido à coesão fornecida pela fração fina da mistura.

“Os materiais cimentados são materiais granulares ou solos que recebem adição de cimento, cal ou outro aditivo, de forma a proporcionar um acréscimo significativo de rigidez do material natural e um aumento da resistência à compressão e à tração” (BERNUCCI, *et al.*, 2008).

“Existem ainda misturas asfálticas e solo-asfalto que se destinam à camada de base e que poderiam ser classificadas como coesivas. Nesse caso a ligação entre agregados ou partículas é dada pelo ligante asfáltico, sendo a resistência à tração bastante superior aos solos argilosos, e por isso são enquadrados em classe diferente dos solos e dos materiais cimentados” (BERNUCCI, *et al.*, 2008).

“Os materiais mais empregados em pavimentação da classe dos granulares e solos, mais comuns em bases, sub-bases e reforço do subleito são: brita graduada simples (BGS) e brita corrida; macadame hidráulico; macadame a seco; misturas estabilizadas granulometricamente (estabilizadas por combinação de materiais para atender certos requisitos ou mecanicamente); solo-agregado; solo natural; solo melhorado com cimento ou cal” (BERNUCCI, *et al.*, 2008).

É importante ressaltar que devido à preocupação com o meio ambiente, novas técnicas de reutilização e reciclagem de novos materiais estão em uso crescente em pavimentação, tais como: escória de alto-forno; agregado reciclado de resíduo sólido de construção civil e demolições; rejeitos de extração de rochas ornamentais; mistura asfáltica fresada, dentre outros.

“Os materiais cimentados mais freqüentes em bases, sub-bases e reforço do subleito são: BGTC (brita graduada tratada com cimento); solo-cimento; solo-cal; solo-cal-cimento; concreto rolado (CCR – concreto compactado a rolo)” (BERNUCCI, *et al.*, 2008).

As misturas asfálticas mais habituais em bases, sub-bases e reforço do subleito são: solo-asfalto; solo-emulsão; macadame betuminoso e base asfáltica de módulo elevado (BERNUCCI, *et al.*, 2008).

A Figura 6 a seguir, ilustra os principais tipos de materiais empregados em pavimentação. Um melhor detalhamento pode ser encontrado na fonte citada acima.



a) Brita graduada simples



b) Bica corrida



c) Rachão



d) Macadame hidráulico

(Foto: Nogami, década de 1950, Rodovia Dutra)



e) Macadame seco



f) Macadame seco: detalhe

Figura 6. Materiais granulares empregados em base, sub-base ou reforço de subleito (BERNUCCI, *et al.*, 2008).

2.2 GPR (*Ground Penetrating RADAR*): princípios e funcionamento

Nesta seção descreve-se sobre os princípios básicos de funcionamento de um RADAR de Penetração no Solo associados com a propagação dos pulsos emitidos pelo GPR, que são ondas de rádio compreendidas no espectro eletromagnético, que influem de maneira considerável na prospecção com GPR.

Os sistemas de RADAR de Penetração no Solo ou Georadar usam pulsos EM, que são ondas de rádio compreendidas dentro do espectro eletromagnético, com uma frequência central variando de 10 MHz até 2.5 GHz para determinar as localizações e dimensões de camadas e objetos em materiais eletricamente distintos (SAARENKETO, 2006). Os sistemas de RADAR transmitem pulsos eletromagnéticos em um meio e quando estes encontram uma interface eletricamente distinta, parte da energia é refletida de volta enquanto o restante seguirá adiante sendo refletida novamente por outra interface ou absorvida totalmente. Estes sistemas de GPR possuem tipicamente os seguintes componentes: um gerador de pulsos com uma dada frequência e potência; uma ou mais antenas que transmitem o pulso pela sub-superfície; um classificador e registrador de dados que capturam e registram os sinais refletidos pelo meio.

O uso de antenas GPR se dividem em dois grandes grupos: antenas “sem contato” ou “*air-coupled antennas*”, usualmente chamadas de antenas “*horn*” e as “antenas de contato” ou “antenas de arraste”, também chamadas de “*ground-coupled antennas*”. As Figuras 7 e 8 mostram o aspecto de uma antena “*air-coupled*” e “*ground-coupled*” respectivamente, enquanto a Figura 9 mostra o esquema de funcionamento de uma antena “*horn*” em uma estrutura de pavimento.



Figura 7. Aspecto de uma “Air-coupled antenna” dispostas em duas polaridades, sendo calibrada com uma placa de metal (SAARENKETO, 2006).

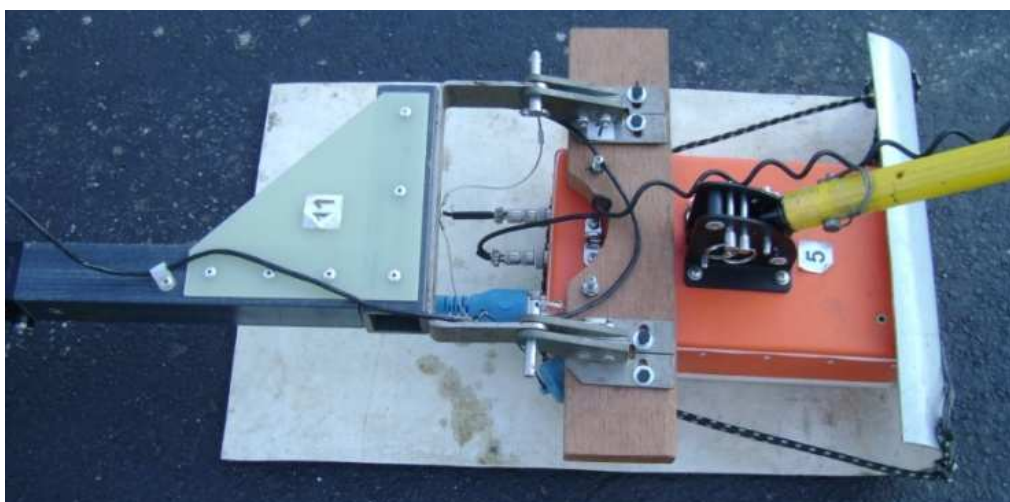


Figura 8. Aspecto de uma antena de contato “Ground-coupled antenna” modelo GSSI SIR 3000 – 900 MHz.

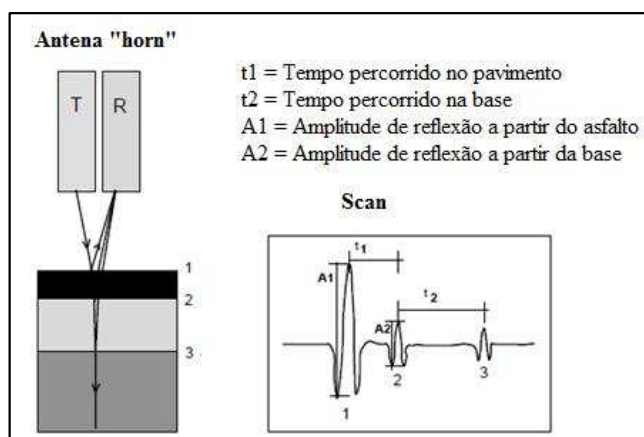


Figura 9. Princípio básico da técnica GPR com antena “horn” para análise de pavimento (SAARENKETO, 2006).

A Figura 7 mostra o procedimento para calibração do sistema GPR. A placa metálica funciona como um refletor perfeito auxiliando na identificação da interface da superfície, bem como na obtenção de valores dielétricos. Segundo Saarenketo (2006), as dimensões dessa placa deve ser próximas de (1m x1m x 0,03m) e a antena deve estar entre 40 – 50 cm de altura sobre a mesma.

Pela análise da Figura 9, T representa a antena transmissora e R a antena receptadora. A interface 1 representa a interface do ar e a camada de asfalto, 2 representa a interface do asfalto com a base e 3 representa a interface da base com a sub-base (SAARENKETO, 2006). O *Scan* é o pulso emitido pelo sistema GPR onde $A1$ é a amplitude total de reflexão na camada de revestimento, $A2$ a amplitude total de reflexão na interface entre o revestimento e a base, t_1 o tempo de propagação na camada de revestimento e t_2 o tempo gasto para percorrer a camada de base, lembrando que estes tempos são os tempos de ida e volta do sinal (SAARENKETO, 2006).

O princípio básico de funcionamento do Georadar é de que se conhecendo o tempo t e a velocidade v , de propagação do pulso, é possível determinar a distância d em que um determinado objeto está da fonte emissora do pulso.

$$d = \frac{v \times t}{2} \quad (1)$$

Quando a interface está entre duas camadas asfálticas, a similaridade entre as constantes dielétricas dos materiais tornam a detecção desta interface mais complexa por conta de suas similaridades na constante dielétrica. No entanto, se o revestimento asfáltico está sobre um solo ou material granular de base, as constantes dielétricas são satisfatoriamente diferentes, facilitando a detecção da interface (GONÇALVES e CERATTI, 1998).

Este é um método geofísico de prospecção que possibilita a obtenção de imagens de alta resolução das camadas sub-superficiais rasas. A qualidade da imagem originada pode variar em virtude dos pulsos refletidos, refratados e difratados, que são condicionados às propriedades dielétricas do material investigado e da interação deste com o meio onde está inserido, como também da frequência da antena utilizada.

Em linhas gerais quanto maior a frequência da antena utilizada, maior será a resolução vertical da imagem e menor será a profundidade de penetração no solo, isso porque a profundidade de penetração no meio também depende das características elétricas do mesmo. A Figura 10 a seguir ilustra este esquema.

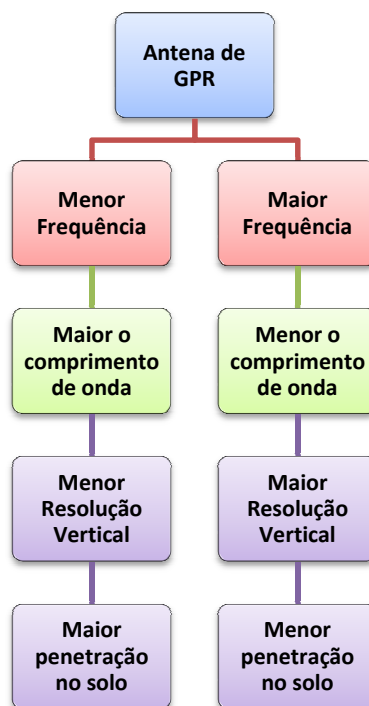


Figura 10. Características básicas de funcionamento de uma antena quanto à frequência, velocidade, comprimento de onda, resolução e capacidade de penetração no solo.

Um aspecto importante a ser observado é que o GPR por si só não avalia ou quantifica os alvos detectados, ficando estas etapas na responsabilidade do analista o qual, de maneira interativa, pode contar com o apoio de programas de computador desenvolvidos com propósitos específicos de auxílio à interpretação dos dados levantados (GONÇALVES e CERATTI, 1998).

2.2.1 Princípios da técnica GPR

A propagação e reflexão dos pulsos emitidos pelo RADAR são controladas pelas propriedades dielétricas do material que constitui o meio, e inclui: a suscetibilidade magnética, ou seja, o magnetismo do material; a permissividade dielétrica e a condutividade elétrica (DAVIS e ANNAN, 1989).

O campo eletromagnético é a interação de um campo magnético com um campo elétrico, ambos perpendiculares entre si e perpendiculares ao eixo Z que determina sua direção, a Figura 11 representa a interação destes dois campos. Se o campo elétrico é vertical, ou seja, movendo-se no plano $Y - Z$ e o campo magnético é horizontal, ou seja, movendo-se no plano $X - Z$, então a energia é polarizada verticalmente; caso ocorra o inverso, ou seja, o campo elétrico é horizontal e o campo magnético é vertical, então a energia está polarizada horizontalmente (MATHER, 2004).

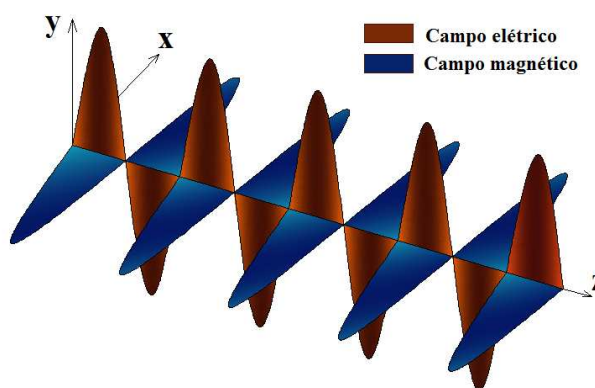


Figura 11. Aspecto de um campo eletromagnético polarizado verticalmente. O eixo Z define a direção do campo eletromagnético. Fonte: Adaptação Mather (2004).

A técnica do GPR está fundamentada no fenômeno de propagação de ondas eletromagnéticas, geridas segundo as Equações (2), (3), (4) e (5) de Maxwell aplicadas a meios eletromagnéticos que descrevem a indução eletromagnética ocasionada por um campo elétrico no vácuo e que constituem base da teoria eletromagnética. Ela envolve uma série de parâmetros constantes dos materiais que ocorrem no sub-solo, tais como: a suscetibilidade magnética, ou seja, a permeabilidade magnética (μ); a permissividade dielétrica (ϵ) e a condutividade elétrica (σ).

Lei de Gauss para a eletricidade:

$$\vec{\nabla} \times \vec{D} = \rho \quad (2)$$

Lei de Gauss para o magnetismo:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = 0 \quad (3)$$

Lei de Ampère:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4)$$

Lei de indução de Faraday:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (5)$$

Onde:

\vec{D} = Deslocamento elétrico (C/m²);

ρ = Densidade de carga livre (C/m³);

\vec{B} = Indução magnética (Weber/m²);

\vec{H} = Campo magnético (A/m);

\vec{J} = Densidade de corrente elétrica (A/m²);

\vec{E} = Campo elétrico (V/m).

A ligação entre as imagens de RADAR e as propriedades das ondas EM (*permissividade, permeabilidade e condutividade*) é melhor visualizada pelas Equações (6), (7), (8), (9) e (10) que descrevem o comportamento da propagação das ondas EM na sub-superfície, mostradas a seguir. Se considerar uma única frequência, linearmente polarizada e as ondas EM viajando na direção Z (Figura 11), pode-se, a partir das equações de Maxwell, chegar às Equações (6), (7), (8), (9) e (10) (KNIGHT, 2001). Onde \vec{E} representa o vetor do campo elétrico e \vec{H} representa o vetor do campo magnético.

$$\vec{E}(z, t) = E_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (6)$$

$$\vec{H}(z, t) = H_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (7)$$

Onde E_0 e H_0 são as amplitudes complexas, ω a frequência angular, α a constante de atenuação e β o parâmetro de fase que podem ser obtidos respectivamente pelas Equações 8 e 9 a seguir:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon}{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon}\right)^2} - 1 \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon}{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon}\right)^2} + 1 \right]^{1/2} \quad (9)$$

Logo a velocidade da onda EM também pode ser obtida por:

$$v = \frac{\omega}{\beta} \quad (10)$$

Nos casos em que os meios a serem pesquisados forem anisotrópicos, a relação que existe entre estas grandezas é expressa através dos tensores da permissividade, permeabilidade e condutividade representadas respectivamente por ε , μ e σ (CARCIONE e CAVALLINE, 1996).

$$\vec{D} = \vec{\varepsilon} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (11)$$

$$\vec{B} = \vec{\mu} + \vec{H} \quad (12)$$

$$\vec{D} = \vec{\sigma} \times \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J}_m \quad (13)$$

Onde: \vec{J}_m é a densidade de corrente devido tanto a polarização como magnetização do material em consequência dos campos elétrico e magnético aplicados (CARCIONE e CAVALLINE, 1996).

No entanto, alguns autores (CARCIONE e CAVALLINE, 1996; GREAVES et al., 1996; DOURADO, 2004) acham aceitável considerar o meio como sendo isotrópico e homogêneo, dessa forma as equações são simplificadas. Carcione e Cavallini (1996) simplificam estas expressões nas Equações (14), (15) e (16), enquanto que na Equação (17), o campo magnético é desprezado na expressão mostrada por (DOURADO, 2004).

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (14)$$

$$\vec{D} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (15)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (16)$$

$$\nabla^2 E = \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (17)$$

A Lei de Snell, dada pela Equação (18) e exemplificada pela Figura 12, descreve o comportamento da energia da onda incidente numa interface onde há mudanças no contraste da impedância dielétrica dos meios (TELFORD, GELDART e SHERIF, 1990).

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (18)$$

Onde:

θ_1 = Ângulo de reflexão, que é igual ao ângulo de incidência do pulso;

θ_2 = Ângulo de refração;

v_1 = Velocidade de propagação no meio 1;

v_2 = Velocidade de propagação no meio 2.

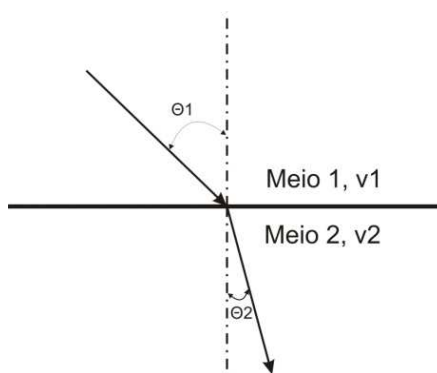


Figura 12. Lei de Snell - Se $v_1 > v_2$ o ângulo $\theta_1 > \theta_2$ o raio refratado se aproxima da normal. Se $v_1 < v_2$ o ângulo $\theta_1 < \theta_2$ o raio refratado se distancia da normal.

O método sísmico e a técnica de RADAR possuem um comportamento dinâmico diferente em relação ao estudo da atenuação da amplitude e dispersão, mas o comportamento cinemático (tempo de propagação do pulso) é similar (LOPES, 2009). Isto deve-se ao fato das correntes de deslocamento prevalecerem sobre as correntes de condução nas frequências utilizadas pela técnica GPR em meios mais

resistivos, e nestas condições, um pulso eletromagnético propaga sem dispersão e tem velocidade de propagação controlada apenas pelas propriedades dielétricas do material (DAVIS e ANNAN, 1989).

Quando um pulso de RADAR incidi em uma interface que separa meios que possuem propriedades eletromagnéticas diferentes, ou seja, aonde existe uma descontinuidade elétrica (uma interface onde há uma mudança na impedância eletromagnética da onda), o campo eletromagnético é refletido parcialmente. A magnitude e o caráter da onda EM refletida são controlados pela geometria e pelo contraste das propriedades elétricas dos materiais existentes (LOPES, 2009). As variações da velocidade, atenuação do sinal e energia refletida nas interfaces estão diretamente associadas às alterações no teor de umidade do material (DAVIS e ANNAN, 1989).

A atuação do campo eletromagnético em um material produz um movimento de carga elétrica, ou seja, uma corrente elétrica que pode ser de dois tipos: corrente de condução e corrente de deslocamento, sendo que ambas são dissipadoras de energia do campo e ocorrem simultaneamente no material (ANNAN, 1992). As equações com grandezas vetoriais de Maxwell são transformadas em grandezas escalares, com a finalidade de simplificar o modelo matemático. Segundo Lopes (2009), em materiais simples, a corrente de deslocamento relaciona-se com o campo elétrico através de um parâmetro de proporcionalidade (permissividade dielétrica), de acordo com a expressão:

$$J_d = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (19)$$

Onde:

J_d = Densidade de corrente de deslocamento (A/m^2);

ε = Permissividade dielétrica (F/m);

$\frac{\partial E}{\partial t}$ = Variação do campo elétrico em função do tempo.

A velocidade e a atenuação são os parâmetros que descrevem a propagação das ondas de alta frequência no subsolo, e como o objetivo central é analisar a parte cinemática do fenômeno, deve-se considerar a variabilidade da velocidade,

relacionando o tempo de propagação e as propriedades dielétricas e condutivas do material, onde se propagam (LOPES, 2009).

Segundo Saarenketo (2006) a propriedade elétrica mais importante que afeta os resultados de estudos realizados com o GPR é a permissividade dielétrica e esta afeta a velocidade do sinal do GPR nos materiais, como tal, ela é muito importante para conhecer precisamente como calcular a profundidade correta do objeto em estudo. A permissividade dielétrica relativa é uma função de frequência. A permissividade dielétrica relativa K^* (ω), também chamada de “Valor dielétrico ou constante dielétrica” possui um valor adimensional e é uma relação da permissividade dielétrica (ϵ), que geralmente é um número complexo, e da permissividade dielétrica no vácuo (ϵ_0) cujo valor é igual a $8,85 \times 10^{-12}$ F/m.

$$K^* = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (20)$$

O valor dielétrico também pode ser expresso da seguinte forma (DAVIS e ANNAN, 1989; HOEKSTRA e DELANEY, 1974):

$$K^*(\omega) = K'(\omega) - iK''(\omega) \quad (21)$$

Onde:

K^* = Valor dielétrico, constante dielétrica ou permissividade dielétrica;

K' = Parte real do valor dielétrico;

iK'' = Parte imaginária do valor dielétrico, a parte relacionada à perda;

ω = Frequência angular ($2\pi f$).

A relação entre a condutividade elétrica σ (S/m) e a parte imaginária do valor dielétrico é:

$$K''(\omega) = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \quad (22)$$

A parte imaginária K'' pode ser dividida dentro dos componentes de perda de alta frequência. O valor de K'' contido na Equação (23) é definido como sendo um fator de perda dependente da frequência e da condutividade dos materiais que está relacionada ao afrouxamento das moléculas de água, ou seja, em frequências muito elevadas, a molécula de água sofre variações intensas na polaridade, ocasionando o

fenômeno de relaxação, o qual gera grandes perdas de energia por atenuação e é mostrada na Figura (15) (DAVIS e ANNAN, 1989). Em decorrência, uma onda eletromagnética com frequência muito elevada o pulso se propaga muito pouco ou até mesmo não se propaga, conforme é apresentada por (DAVIS e ANNAN, 1989):

$$K^* = K' - i \left(K'' + \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \right) \quad (23)$$

K^* = Valor dielétrico, constante dielétrica ou permissividade dielétrica;

K' = Parte real do valor dielétrico;

K'' = Fator de perda;

ω = Frequência angular ($2\pi f$);

σ = Condutividade elétrica (S/m);

ϵ_0 = Permissividade dielétrica no espaço livre, vácuo ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m).

A tangente da perda, indicada pela $\tan(\delta)$, é mostrada por (HOEKSTRA e DELANEY, 1974):

$$\tan \delta = \frac{K''(\omega)}{K'(\omega)} \quad (24)$$

Contudo se a parte referente ao campo magnético for negligenciada, ou seja, a susceptibilidade magnética não for levada em conta, então as fórmulas utilizadas em pesquisas com GPR se tornam mais simples, o que é mais usual. Segundo Saarenketo (2006) as principais formulações empregadas em pesquisas envolvendo GPR e rodovias são as seguintes:

$$v = \frac{c}{\sqrt{K^*}} \quad (25)$$

Onde v é a velocidade de propagação da onda em (m/ns), c é a velocidade da luz no vácuo (0,3 m/ns) e K^* a permissividade dielétrica relativa.

Nas pesquisas com o GPR, uma medida da velocidade da sub-superfície pode ser determinada coletando os dados usando uma geometria CMP (*common mid point*), aonde a distância entre a antena transmissora e receptora é aumentada gradualmente a cada registro (KNIGHT, 2001). A metodologia CMP, de coleta de dados, será abordada mais adiante nesta dissertação. No entanto este tipo de pesquisa

e análises de dados requeridos para a determinação da velocidade é descrita em detalhes em (DAVIS e ANNAN, 1989).

A determinação da velocidade, através das hipérboles presentes no radargramas, é importante para poder converter os dados gravados em função da amplitude e do tempo em função da amplitude e da profundidade.

Segundo Saarenketo (2006), o coeficiente de reflexão (k), o valor da permissividade dielétrica relativa da primeira camada K_1^* e o valor da permissividade dielétrica relativa da segunda camada dada por K_2^* , são mostradas na Figura 13 e podem ser relacionados pela Equação (26), podendo ser entendido como o contraste da impedância dielétrica.

$$k = \frac{\sqrt{K_2^*} - \sqrt{K_1^*}}{\sqrt{K_2^*} + \sqrt{K_1^*}} \quad (26)$$

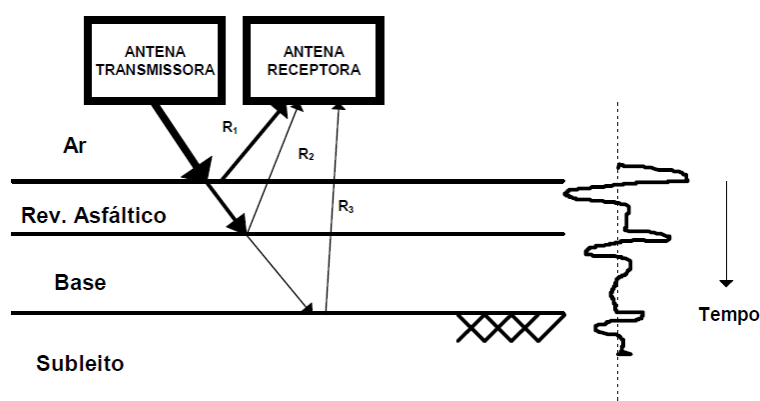


Figura 13. Emissão e reflexão de ondas eletromagnéticas nas interfaces do pavimento (GONÇALVES e CERATTI, 1998).

O coeficiente de penetração (R) no solo pode ser obtido por (SAARENKETO, 2006):

$$R = 1 - k \quad (27)$$

Outros parâmetros importantes são a atenuação no meio (A), dada em (dB/m) e a condutividade elétrica σ do meio (S/m) cuja relação entre elas pode ser expressa por (SAARENKETO, 2006):

$$A = \frac{1635 \sigma}{K^*} \quad (28)$$

Um fenômeno importante na propagação das ondas eletromagnéticas é a condutividade elétrica do meio. A influência mútua do campo eletromagnético com meios que apresentam condutividade elevada, leva à perda de energia por atenuação, a qual aumenta intensamente para valores de frequência muito elevadas. Na Figura 14 e 15 observa-se a variação da velocidade em função da frequência e da condutividade respectivamente (DAVIS e ANNAN, 1989). Além de depender da frequência e outros fatores, a atenuação aumenta rapidamente para as frequências maiores que 100 MHz devido o efeito de relaxação da molécula de água, que ocorre nas proximidades da frequência de 10 GHz. Pode-se verificar pela Equação (28) que a condutividade elétrica é diretamente proporcional a atenuação do pulso de RADAR, portanto quanto maior for a condutividade elétrica do meio maior será a atenuação do pulso. Isso determina as limitações de aplicabilidade da técnica do GPR em meios muito condutivos, por exemplo, a água marinha, devido a sua salinidade, apresenta condutividade de 3×10^3 mS/m. Conseqüentemente, nesse meio, uma onda eletromagnética sofreria intensa atenuação e praticamente não se propagaria (LOPES, 2009).

O comprimento de onda (λ) pode ser obtido por (SAARENKETO, 2006):

$$\lambda = \frac{1000 c}{f \sqrt{K^*}} \quad (29)$$

Onde (c) é a velocidade de propagação da luz no vácuo (3×10^8 m/s), (f) a frequência em (MHz) (SAARENKETO, 2006).

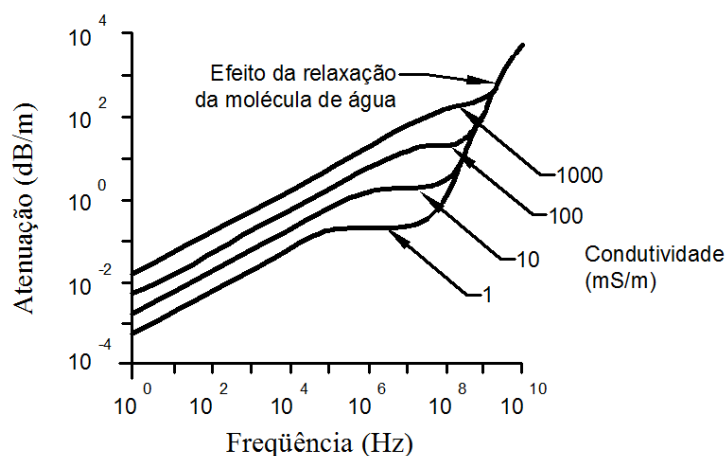


Figura 14. Relação entre a frequência, atenuação e condutividade (Adaptada de DAVIS e ANNAN, 1989).

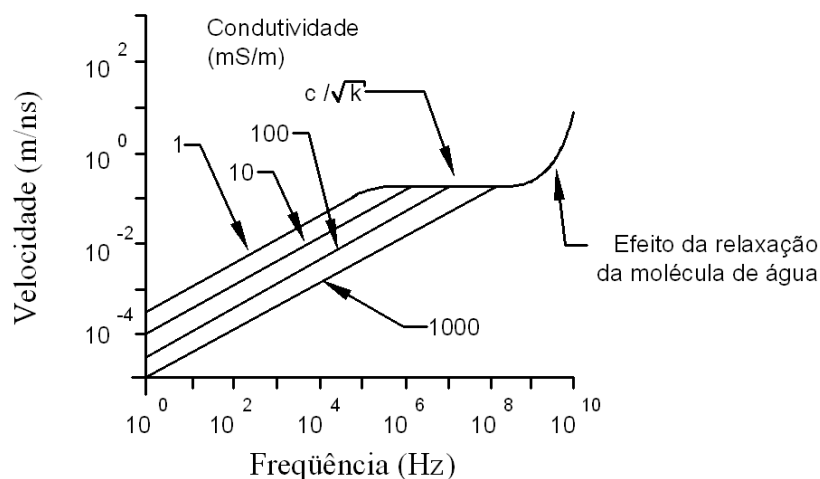


Figura 15. Relação entre a frequência, velocidade e condutividade (Adaptada de DAVIS e ANNAN, 1989).

A faixa correspondente onde a velocidade é constante encontram-se as frequências de trabalho mais adequadas para o método GPR. Isto porque é minimizada a possibilidade de dispersão do sinal devido a variação de velocidade com a frequência e pela necessidade de se fazer a conversão do radargrama de tempo para profundidade. Pode-se também verificar na Figura 15, o efeito de relaxação da molécula de água para frequências maiores que 1 GHz o que pode originar um entrave no alcance do sinal de RADAR, devido a alta dissipação de energia no meio propagado.

Existe uma simplificação comumente pressuposta na interpretação dos dados de GPR, em condições de baixas perdas que é mostrada matematicamente pela Inequação (30) (KNIGHT, 2001):

$$\frac{\sigma}{\omega \epsilon} < 1 \quad (30)$$

Em geral, esta é uma hipótese válida por causa das elevadas frequências que envolvem o uso do GPR e ao fato de haver restrições do uso do método em regiões onde a condutividade (σ) é demasiadamente elevada; altos valores da condutividade elétrica resultam em um meio altamente atenuante (KNIGHT, 2001). Outra hipótese geralmente empregada é fazer com que a permeabilidade magnética (μ) em todos os locais da sub-superfície seja igual a permissividade magnética no vácuo ($\mu_0 = 4 \times 10^{-7} \text{ henries/m}$) (KNIGHT, 2001).

Esta hipótese simplifica as expressões da velocidade e da constante de atenuação conforme mostram as Equações (31) e (32):

$$v \approx \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon}} \quad (31)$$

$$\alpha \approx \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon}} \quad (32)$$

Estas duas expressões mostradas acima mostram que a constante de atenuação sofre uma grande influência da condutividade enquanto que a velocidade sofre influência apenas da permeabilidade magnética e da permissividade magnética. Por esta razão o GPR trabalha bem em regiões com areia e pedregulhos, que tendem ter resistividade alta. Enquanto que em regiões onde se tem materiais eletricamente condutivos, como é o caso de algumas argilas, este método alcança pouca profundidade e conseqüentemente passa a ter seu uso restrito para alguns tipos de trabalhos. Dependendo do tipo de argila, um teor na ordem de 5-10% pode reduzir a profundidade de penetração do RADAR a menos de um metro (WALTHER, PITCHFORD e OLHOEFT, 1986).

As Equações (31) e (32) acima expostas para a velocidade e coeficiente de atenuação mostram de que maneira a estrutura dielétrica do subsolo afeta o que é visto nas imagens de GPR. Existem, no entanto, muitos outros fatores, como o acoplamento das antenas sobre o solo, a distribuição da energia irradiada, os mecanismos de perdas de energia que podem afetar a imagem do RADAR complicando a interpretação dos dados (KNIGHT, 2001).

Outro fator importante ao se escolher as antenas em função da profundidade que se deseja alcançar é estudar o alcance do sinal de RADAR, que nada mais é do que o desempenho do sistema ou razão entre a amplitude do sinal transmitido e a sensibilidade mínima do receptor, medida em (dB), que pode ser determinado pela seguinte expressão dada por (DAVIS e ANNAN, 1989):

$$Q = \frac{\xi_T \xi_R G_T G_R g \sigma_c e^{-4\alpha L}}{64 \pi^3 f^2 L^4} \quad (33)$$

Q = Desempenho do sistema;

ξ_T = Eficiência da antena transmissora;

ξ_R = Eficiência da antena receptora;

G_T = Ganho da antena transmissora;

G_R = Ganho da antena receptora;

g = Ganho devido ao espalhamento originado pelo alvo;

σ_c = Área da seção transversal do espalhamento do alvo;

α = Coeficiente de atenuação no meio.

f = Frequência;

L = Distância do alvo;

2.2.2 Características elétricas da água nos solos e agregados

Todos os materiais utilizados na construção de estradas podem ser descritos como uma composição de vários materiais, tais como: ar, água, agregados minerais, argilas, partículas coloidais, sais e componentes orgânicos. Os valores dielétricos de cada um deles é uma combinação: das constantes dielétricas individuais de cada componente, da fração de volume dos componentes, da geometria destes componentes e das interações elétrico-químicas entre os componentes (KNOLL e KNIGHT, 1994).

A água é o componente mais importante presente nos solos e que afeta a permissividade dielétrica dos solos que, em maior ou menor proporção, também afeta as propriedades mecânicas dos mesmos (SAARENKETO, 1998). Geralmente a magnitude desses efeitos depende das propriedades destes materiais, da umidade e da história de saturação destas camadas (SAARENKETO e SCULLION, 1995).

A presença de água no solo afeta as propriedades dielétricas do mesmo, tornando um fator importante a ser considerado uma vez que a presença da molécula de água aumenta a condutividade e sua constante dielétrica. A presença de água nos materiais está ligada diretamente à sua porosidade e granulometria. A porosidade do solo é definida como a fração volumétrica de vazios, ou seja, o volume de vazios dividido pelo volume total do solo e que varia de acordo com o grau de compactação do solo. Quando um solo tem seus poros completamente ocupados por água, diz se

que está saturado. Ao contrário, quando está completamente seco, seus poros estão completamente ocupados por ar. O teor de umidade é a porcentagem de água contida em certa massa de solo, tomando-se como referência o peso da massa do solo seco, ou seja, o peso das partículas, sendo determinada pela seguinte equação (DER/MT, 1994):

$$h = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \quad (34)$$

Onde:

h = Teor de umidade (%);

P_h = Peso do solo úmido;

P_s = Peso do solo seco.

Existem vários métodos usados para a determinação da umidade, dentre os mais utilizados estão:

- Método da estufa (apropriado para uso em laboratório);
- Método do fogareiro (apropriado para uso em campo);
- Método do picnômetro (próprio para uso em campo);
- Método do álcool (também utilizado no campo);
- Método *speedy* (mais utilizado em campo).

Os sedimentos finos e argilosos apresentam superfície eletricamente carregada devido à presença de íons, o que ocasiona a adsorção de moléculas de água, gerando um mecanismo de condutividade superficial (MITCHELL, 1993). Isso faz com que os materiais argilosos sejam muito condutores e com isso a energia eletromagnética seja dissipada, fazendo com que o pulso refletido seja muito minimizado. Não há propagação desse tipo de energia em camadas de argila muito espessas e os sinais presentes nos registros de RADAR, abaixo dessa camada, podem ser considerados como ruídos do sistema, no entanto se a espessura for muito fina parte da energia pode atravessá-la (JOL e SMITH, 1995).

Segundo Saarenketo (1998) a água presente nos solos e agregados é classificada da seguinte forma: água higroscópica, capilar e livre; também ressalta que os meniscos formados pela ação da água em contato com o solo podem ter

grande influência sobre o comportamento destes materiais. A distribuição da água nos solos é descrita na Figura 16.

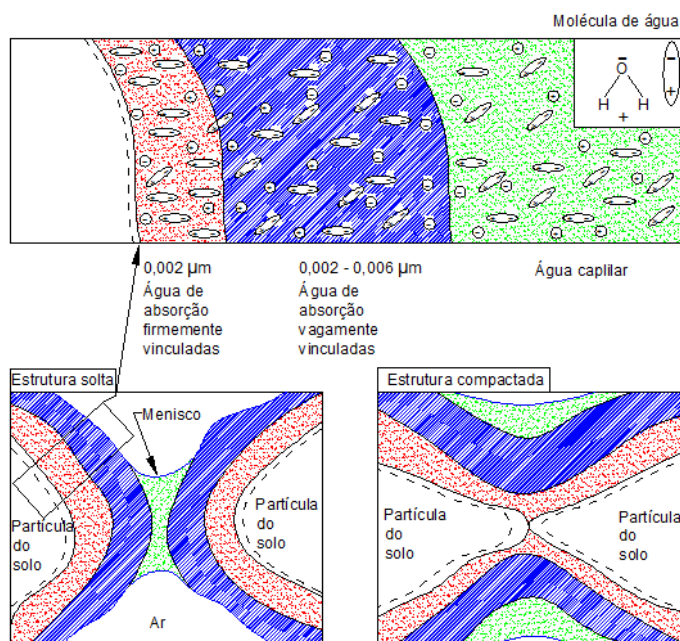


Figura 16. Estrutura de ligação entre a molécula de água e uma partícula sólida (Adaptada de SAARENKETO, 1998).

2.2.2.1 Água higroscópica, água de adsorção ou adesiva

Essas moléculas de água estão firmemente fixadas (*retidas*) por adsorção às partículas minerais do solo e ainda se encontra no solo seco ao ar livre. São formadas camadas delgadas ou finas, uma espécie de *capas* ou *filmes*, em torno das partículas minerais. Elas não se movem, exceto sob a forma de vapor d'água. Esta camada de água é afetada pela temperatura, pela umidade do ar e pela pressão atmosférica.

Uma camada de água higroscópica consiste de uma camada monomolecular extremamente bem arranjada, onde as superfícies dos minerais são constituídas de cargas negativas, além disso, ligadas firmemente e frouxamente às camadas de água de adsorção. Íons e outras impurezas superficiais ativas perturbam a estrutura da água estando eles hidratados ou não. Esses íons não hidratados ocuparão os espaços, e assim, impedirão a estrutura da água e íons hidratados de atrair moléculas de água com cargas elétricas opostas (MITCHELL, 1993).

2.2.2.2 Água Capilar

A água capilar é retida no solo pela tensão superficial em forma de películas em torno das partículas minerais que constituem o solo. Ela circula através de solos de grãos muito finos, como solos argilosos e siltosos, que deixam entre si canais de diâmetro capilar e contraria muitas vezes a ação da gravidade (BAPTISTA, 1976). O seu limite superior é dado pela capacidade de campo (*água gravitacional*) e o limite inferior é dado pelo coeficiente higroscópico (*água higroscópica*).

Na ciência que estuda os solos, a água capilar é classificada em duas camadas, interior e exterior. A interior, camada ligeiramente difusiva é em contato intermediário com a água higroscópica como uma zona de transição entre esta e a água capilar externa. A água capilar externa é controlada pela tensão superficial e por forças coloidais, enquanto a água capilar interna é controlada apenas pela forças coloidais. O total de água capilar presente é controlada pela textura e estrutura do solo, pela matéria orgânica e pela ação da gravidade (LYON e BUCKMAN, 1952).

Em uma massa de solo parcialmente saturada, a água pode desenvolver uma superfície de tensão, formando meniscos capilares entre suas partículas e o ar (MITCHELL, 1993). Esta interface entre o ar e a água, que é também considerada como um caso especial de película contrátil, é importante para a mecânica dos solos devido à sua propriedade de exercer tração (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

2.2.2.3 Água livre ou gravitacional

A água gravitacional circula livremente através dos poros dos solos, ocupando os poros maiores e sendo retida levemente pelas partículas do solo. Pode ser removida (*drenada*) pela força da gravidade. Seu limite superior é representado pelo solo saturado, ou seja, quando os poros estão totalmente cheios de água, e o limite inferior é dado pela capacidade de campo.

2.2.3 Características elétricas dos solos, agregados, betume e ar

Existe um consenso geral de que propriedades elétricas de materiais incluem a sua:

- Permeabilidade magnética, ou seja, o magnetismo do material;
- Valor dielétrico;
- Condutividade elétrica.

A permeabilidade magnética, na maioria dos agregados utilizados em rodovias, é da mesma ordem de grandeza que a do vácuo (SAARENKETO, 1997). Com isso pode-se dizer que as propriedades eletromagnéticas dos materiais utilizados na construção rodoviária podem ser descritas por meio da sua condutividade elétrica e propriedades dielétricas (SAARENKETO, 2003).

Segundo Saarenketo (2006), a suscetibilidade magnética de um solo ou de materiais utilizados em rodovias é considerada igual para o valor do vácuo, e desta maneira não afeta a propagação dos pulsos do GPR.

O termo valor dielétrico ou “permissividade dielétrica relativa” se refere à capacidade de um material para armazenar e depois permitir a passagem de energia eletromagnética quando um campo elétrico lhe é imposto. Ele também pode ser descrito como uma medida da capacidade de um material dentro de um campo eletromagnético que se tornam polarizados e, portanto, responder às ondas eletromagnéticas propagadas. O valor dielétrico de um material é uma função das proporções do volume de seus componentes materiais e as propriedades dielétricas destes componentes. Permissividade dielétrica é, geralmente, uma série complexa, que possui parte real e imaginária, e é uma função da frequência. A parte imaginária é muitas vezes chamada como parte de perda e que é uma medida da proporção da carga transferida na condução e armazenada na polarização (SAARENKETO, 2003).

A condutividade elétrica do solo é atribuível à livre ou restrita transferência de elétrons e íons, o que pode ser atribuído a vários fenômenos. A maioria dos minerais que ocorrem na pedra britada utilizada para construção de pavimentos, tais como quartzo, mica e feldspato, quando estão secos, podem ser considerados resistivos. Assim, a eletricidade é transmitida apenas através de impurezas e perturbações no

seu entrelaçamento de cristais. O betume e pavimentos rolados a quente podem ser considerados, para efeitos de cálculo, como materiais de isolamento elétrico (SAARENKETO, 1997; SAARENKETO, 2003). Mas quando as superfícies destes minerais entram em contato com a água líquida, eletrólitos são formados e a transmissão iônica gerada pelo campo elétrico provoca condução elétrica. O movimento iônico é proporcional à magnitude do campo elétrico, e é afetado pela temperatura, concentração iônica e tamanho iônico. A condutividade elétrica do meio contribui para a atenuação das ondas do GPR e, em certa medida, a sua reflexão (SAARENKETO, 2006). O efeito das variações na condutividade elétrica e na suscetibilidade magnética nos radargramas sintéticos tem sido demonstrado por (MANCILLA e TREVIÑO, 1996).

Conforme mostram as Tabelas 1 e 2, pode-se observar que a velocidade de propagação da onda decresce à medida que aumenta o valor da constante dielétrica relativa do material e que os materiais mais condutivos são também os que apresentam maior atenuação. Pode-se assim antever alguns comportamentos da onda eletromagnética no meio em estudo, como também verificar se o método GPR é o mais adequado para a coleta dos dados que se propõem.

Tabela 1. Propriedades eletromagnéticas típicas de alguns materiais (DAVIS e ANNAN, 1989; (*) NCHRP, 1998).

<i>Material</i>	<i>Constante dielétrica relativa: K'</i>	<i>Condutividade elétrica (mS/m): σ</i>	<i>Velocidade (m/ns): v</i>	<i>Atenuação (dB/m): I</i>
Ar	1	0	0,3	0
* Água (20 °C)	81	0,05	0,033	0,1
Água destilada	80	0,01	0,033	0,002
Água do mar	80	30000	0,015	1000
Areia seca	3 – 5	0,01	0,15	0,01
Areia saturada	20 – 30	0,1 – 1	0,06	0,03 – 0,3
Siltes	5 – 30	1 – 100	0,07	1 – 100
Argilas	5 – 40	2 – 1000	0,06	1 – 300
Granito	4 – 6	0,01 – 1	0,13	0,01 – 1
* Concreto asfáltico (CA)	3 – 6	0,5 – 1,5	0,12	0,05 – 0,5
* Concreto cimento	6 – 11	1 – 3	10	0,5 – 1,5

Tabela 2. Constante dielétrica de alguns materiais mais comumente utilizados em rodovias (AMER-YAHIA e MAJIDZADEH, 2006).

<i>Material</i>	<i>Constante dielétrica relativa: K'</i>
Asfalto seco	2 – 5
Asfalto molhado	5 – 12
Argila seca	2 – 6
Argila hidratada	5 – 40
Concreto seco	4 – 10
Concreto molhado	10 – 20
Areia seca	2 – 6
Areia hidratada	10 – 30
Rocha calcária seca	7
Rocha calcária hidratada	8

2.2.3.1 Propriedades elétricas do revestimento

Conforme apresentado na Tabela 1, pode-se observar que a constante dielétrica pode variar de 1(*ar*) a 81(*água*), embora recentemente resultados superiores a 81 foram publicados por (SAARENKETO, 1997; CAMPBELL, 1990; KNOLL e KNIGHT, 1994). O valor dielétrico da água depende do grau de união entre suas moléculas, no entanto o estado em que a água possui suas moléculas mais unidas é no estado sólido, ou seja, em forma de gelo e nestas condições, segundo Saarenketo (1997) a sua permissividade dielétrica varia entre 3,5 – 3,8.

O efeito da presença da água no que diz respeito às medições em pavimentação ainda não está totalmente entendido, mas como a água é utilizada na emulsão asfáltica, o seu efeito sobre os resultados devem ser analisados. No entanto, pode-se dizer, com base em informações preliminares, que a água não tem qualquer impacto apreciável sobre os resultados das medições no caso de um revestimento usinado a quente novo (SAARENKETO, 1997).

Para agregados britados, absolutamente secos, os seus valores dielétricos variam entre (4,5 – 6,5) e não são dieletricamente dependentes da frequência, ou seja, dispersivos quando totalmente secos, porém rochas ricas em carbonato como as

rochas calcárias possuem valores maiores (SAARENKETO, 1997; SAARENKETO, 2003). A Figura 17 apresenta os resultados obtidos por Saarenketo (1997) em estudo onde se analisou o comportamento da constante dielétrica em função da frequência para quatro tipos de solos finos (*argilas*) no estado seco e posteriormente depois das argilas terem absorvido umidade.

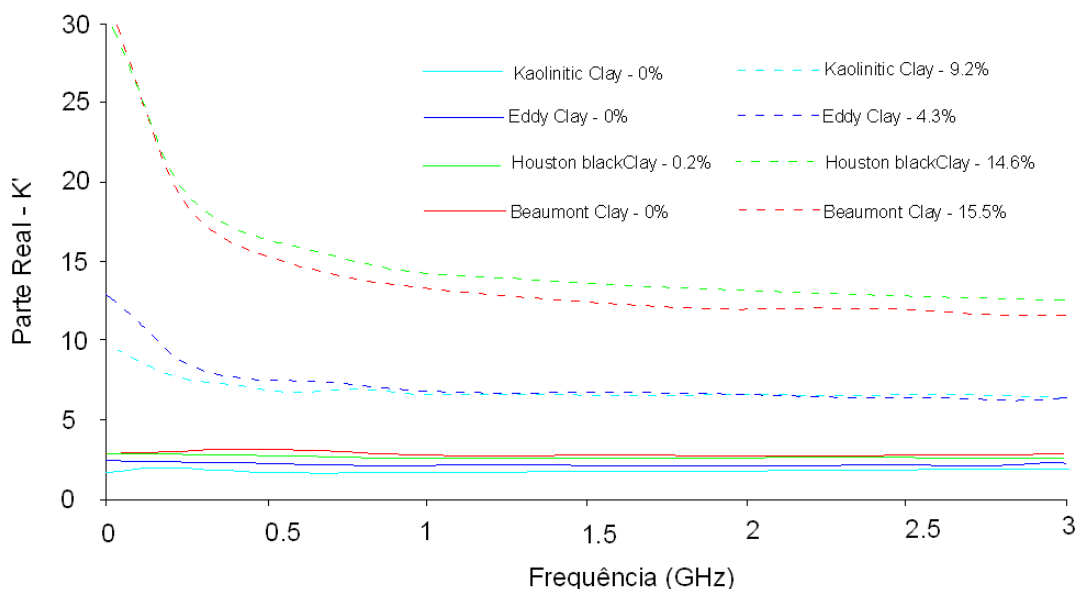


Figura 17. Valores dielétricos para quatro tipos de argilas em função da frequência antes e depois de absorver umidade (SAARENKETO, 1997).

Como se vê na Figura 17, os quatro tipos de argilas estudadas, quando secas, possuem seus valores dielétricos constantes para cada amostra independente da frequência utilizada, mostrando que a frequência utilizada não interferiu quando as amostras estavam secas. Porém, quando elas absorvem água, em diferentes teores, as constantes dielétricas aumentam e não possuem mais um comportamento linear, passando a variar com tipo de frequência utilizada, sendo maiores para as menores frequências. Observa-se que a constante dielétrica aumenta com o aumento do teor de água.

Testes realizados para diversos tipos de betumes, com diferentes viscosidades, mostraram que não houve notáveis flutuações nos valores medidos para a constante dielétrica e estas se mantiveram com valores entre (2,6 – 2,8), como também, indicaram que o envelhecimento das amostras de betume ao sol por seis meses não teve qualquer efeito sensível sobre dielectricidade (SAARENKETO, 2003).

2.2.3.2 Propriedades elétricas do revestimento velho

A análise da Figura 18 permite uma melhor compreensão do comportamento dos valores dielétricos de um pavimento ao longo de sua vida. Pode-se observar que o asfalto novo, no seu primeiro ano, apresenta um valor dielétrico em torno de 5,2 e que este valor sobe cerca de uma unidade após o primeiro inverno. Os valores então permanecem constantes até o sétimo ano aproximadamente quando começam a aumentar lentamente com a presença da água de adsorção. Poucos anos antes do pavimento começar a trincar, as moléculas de água começam a penetrar fazendo com que a união entre o betume e o agregado se desfaça, ocasionando um acréscimo mais acentuado do valor dielétrico. Com o passar do tempo e com o aumento do tráfego o pavimento começa a trincar e com o aumento das fissuras há também um aumento no volume de vazios fazendo com que estes valores se reduzam rapidamente, apresentando valores em torno de 4,5.

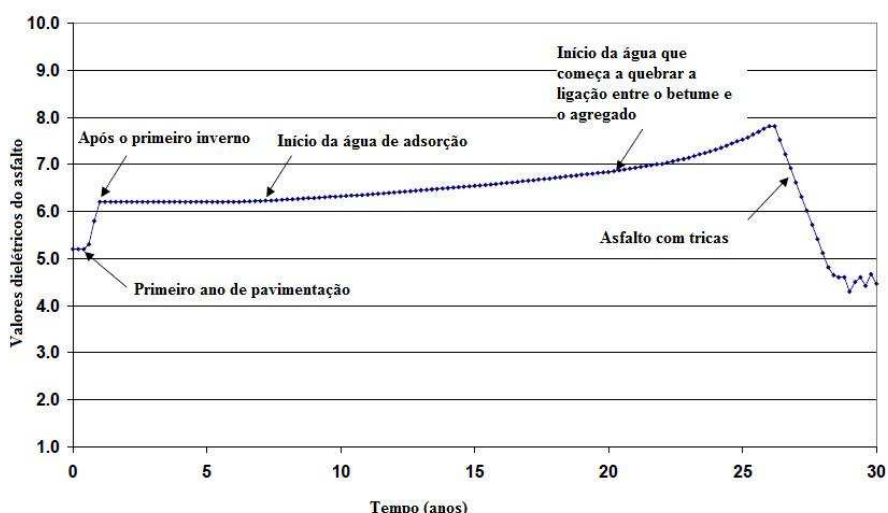


Figura 18. Modelo esquemático que mostra a variação da constante dielétrica em função da idade do pavimento (SAARENKETO, 2003).

2.2.4 Técnicas usadas para medir as propriedades elétricas

As propriedades dielétricas dos materiais podem ser medidas através de várias técnicas ou métodos. As principais técnicas utilizadas para a medição das propriedades elétricas dos materiais são os sistemas GPR (*Ground Penetrating RADAR*), técnica TDR (*Time Domain Reflectometry*), técnica SNA (*Surface Network Analyzer*) e o método baseado na medida da capacitância.

2.2.4.1 Técnica GPR

Segundo Saarenketo (2003), as antenas de contato operam em uma ampla gama de frequências centrais. A clara vantagem das “*ground coupled antennas*” é a profundidade de penetração do sinal e a sua melhor resolução vertical, no entanto, estes sistemas acoplados à superfície ainda não foram otimizados para as pesquisas de transporte rodoviário. Existe uma dificuldade de obter informações quantitativas perto da superfície com estas antenas pelo fato delas terem de permanecer em contato próximo com o meio de coleta de dados, e também existem limitações por causa da velocidade ser normalmente limitada e baixa. Nas pesquisas tecnológicas realizadas em asfalto, as “antenas de contato com o solo” podem ser usadas para mapear diferentes tipos de defeitos, como rachaduras e “*stripping*” que é a perda e/ou falha de adesividade ligante/agregado causando uma deterioração no interior do pavimento, mas não para a medição do conteúdo de vazios do asfalto, devido ao fato de que a precisão na medição da velocidade do sinal nestes sistemas não é alta o suficiente (SAARENKETO, 2003).

Os sistemas de antenas (*air couple*) operam numa frequência central de aproximadamente 1 GHz. Sua profundidade de penetração em estruturas típicas de pavimento é limitada a cerca de 0,5 m e durante a aquisição de dados estas antenas ficam suspensas entre 0,3 – 0,5 metros acima da superfície do pavimento (SAARENKETO, 2003; SAARENKETO, 2006). Estes sistemas normalmente têm a capacidade de transmitir e captar até 1000 “*scans*” por segundo, o que significa que eles podem recolher informações da camada de pavimento de rodovias a velocidades de até 100 km/h (SAARENKETO, 2003). O valor dielétrico na superfície do pavimento é medido com uma antena GPR tipo “*horn*”, usando a técnica da superfície reflexão (SAARENKETO, 1997).

Esta técnica é baseada nas propriedades de reflexão e refração das ondas eletromagnéticas emitidas pelo sistema GPR. Uma das principais vantagens deste método é que ao se usar uma antena “*horn*” ele gera uma série contínua de leituras de um pavimento quando acoplado em um veículo em velocidades compatíveis com a velocidade de operação da rodovia (SAARENKETO, 1997).

Segundo Saarenketo (1997), as técnicas usadas para o GPR na determinação do valor dielétrico incluem: CDP (*Common Depth Point*) técnica usada por (ULRIKSEN, 1982); WARR (*Wide Angle and Refraction*) (ANNAN, DAVIS e SCOTT, 1975) e GPR-RSAD (*RADAR Surface Arrival Detection*) que é uma extensão da normal técnica GPR (SUTINEN e HÄNNINEN, 1990; HÄNNINEN, 1997). No entanto, todas elas são baseadas na medição do tempo gasto para o sinal do RADAR sair da antena transmissora e chegar à antena receptadora.

Os valores dielétricos específicos da camada são calculados a partir da reflexão amplitudes das interfaces e estas amplitudes são comparadas com as reflexões de uma chapa metálica (*refletor perfeito*), ou seja, possui 100% do sinal refletido (SAARENKETO, 2003). Com as informações das amplitudes (medidas em volts nos sistemas analógicos e em bits nos sistemas digitais) e o tempo entre os picos é possível calcular tanto a espessura da camada quanto o seu valor dielétrico, Equação (35) (SAARENKETO e SCULLION, 2000):

$$\varepsilon_a = \left(\frac{1 + \frac{A_1}{A_m}}{1 - \frac{A_1}{A_m}} \right)^2 \quad (35)$$

Onde:

ε_a = dieletricidade do asfalto;

A_1 = amplitude de reflexão do asfalto medidas de pico a pico;

A_m = amplitude de reflexão de uma placa de metal (*refletor perfeito*), medida pico a pico.

A espessura da camada do asfalto pode ser obtida por (LOIZOS e PLATI, 2007):

$$h_1 = \frac{c \Delta t_1}{2 \sqrt{\varepsilon_a}} \quad (36)$$

Onde c é a velocidade da onda no ar, Δt_1 o tempo de viagem da onda entre os picos A_1 e A_2 e ε_a é o valor dielétrico da camada de asfalto. Pelo fato de Δt_1

representar o tempo de ida e volta do pulso do RADAR o parâmetro Δt_1 é dividido por 2 conforme mostra a Equação (36).

Em uma analogia com a Equação (35) é possível determinar também os valores dielétricos para as subcamadas do pavimento utilizando a Equação (37).

$$\sqrt{\varepsilon_b} = \sqrt{\varepsilon_a} \left[\frac{1 - \left(\frac{A_1}{A_m}\right)^2 + \left(\frac{A_2}{A_m}\right)}{1 - \left(\frac{A_1}{A_m}\right) + \left(\frac{A_2}{A_m}\right)} \right] \quad (37)$$

Onde ε_b é o valor dielétrico da camada de base e A_2 amplitude da reflexão no topo da camada de base.

Segundo Saarenketo (2006), as Equações (35), (36) e (37) funcionam bem para pavimentos flexíveis sobre base granular e assumem que não existe atenuação no sinal emitido pelo GPR na camada de superfície. Esta hipótese é razoável para pavimentos asfálticos, dando também valores dielétricos razoáveis para a camada de base quando o revestimento é mais espesso do que 6 centímetros (SAARENKETO, 2006). A Figura 19 apresenta o aspecto das amplitudes A_1 , A_2 e A_3 em função do tempo.

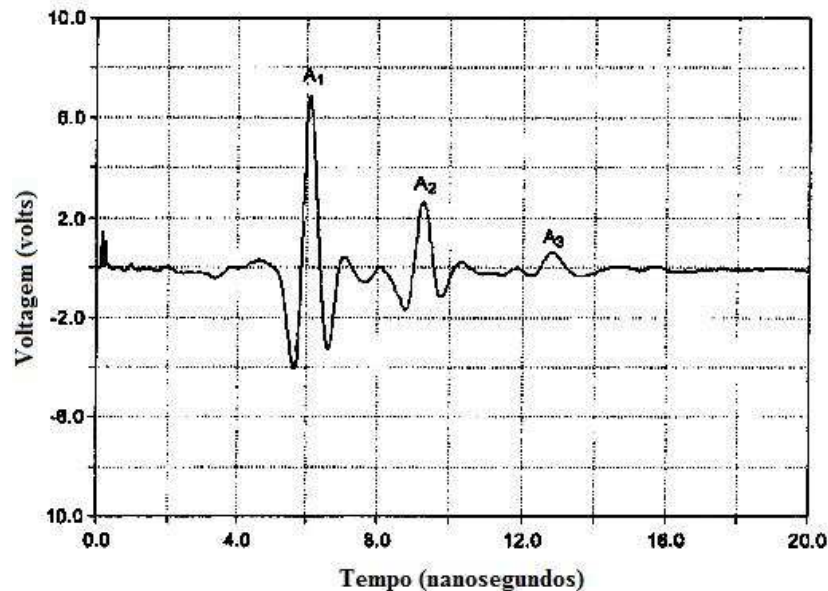


Figura 19. Traço de GPR medido a partir de um pavimento novo com uma antena “horn” de 1 GHz e tendo removido o “background”. Os picos A_1 , A_2 e A_3 são as reflexões a partir da superfície do pavimento, base e sub-base respectivamente (SAARENKETO e SCULLION, 2000).

2.2.4.2 Técnica TDR

A técnica TDR (*Time Domain Reflectometry*) é um método usado para medir as propriedades dielétricas de materiais (FELLNER-FELDEGG, 1969; KUJALA, 1991; SUTINEN, 1992; RAVASKA e SAARENKETO, 1993; TANG e YEUNG, 2006). Este método se enquadra nos métodos das microondas, pois suas ondas eletromagnéticas se enquadram numa faixa de frequência que varia de 1GHz a 100GHz, porém, vem sendo utilizada na determinação do teor de umidade numa faixa mais estreita que varia entre 2GHz a 12GHz (ZBY EK et. al., 2005). As técnicas que utilizam as microondas são melhores que as técnicas que utilizam a capacitância, que operam numa faixa de frequência entre 100 kHz a 100 MHz, porque sofrem muito menos a interferência dos sais presentes na água (ZBY EK et. al., 2005).

Uma das fragilidades deste método, no caso de teste realizados em pavimentos, é que ele mede o tempo de passagem de um sinal de RADAR entre sondas localizadas extremamente perto uma da outra, de forma que o osciloscópio de amostragem não é suficientemente preciso para baixos valores de dieletricidade (SAARENKETO, 1997). Também existe uma evolução para este método chamado de SW-TDR (*Surface Wave – Time Domain Reflectometry*); mais detalhes podem ser visto em (TANG e YEUNG, 2006).

2.2.4.3 Técnica SNA

A técnica “*Surface Network Analyzer*” vem ganhando popularidade nos últimos anos e é descrita por (CAMPBELL, 1990; LAU, SCULLION e CHAN, 1992). Segundo Saarenketo (1997) esta técnica tem a vantagem de poder ser usada para medir a parte real e a parte imaginária da constante dielétrica para um número de frequências ao mesmo tempo, no entanto, só permite fazer medições em materiais homogêneos e de granulometria fina.

2.2.4.4 Técnica baseada na medida da capacitância

Esta técnica é um método eletromagnético e que ganhou mais popularidade recentemente. Ela usa sondas baseadas na capacitância para medir o valor dielétrico na superfície do pavimento e este valor é então usado para calcular o índice de vazios utilizando um fator especial de calibração (SAARENKETO, 2003). Nos últimos anos ela vem sendo utilizada nos controles de qualidade em pavimentação, mais precisamente no controle de compactação dos materiais.

No entanto, um dos pontos negativos é que estas sondas têm sido muito sensíveis quando a superfície do revestimento é áspera ou rugosa (SAARENKETO, 2003).

A variação da capacitância pode ser definida como (SAARENKETO, 1997):

$$\Delta C = C_a(\varepsilon_r - 1) \quad (38)$$

Onde:

ΔC = variação da capacitância;

C_a = capacitância ativa da sonda;

ε_r = permissividade relativa do material.

2.2.5 Peso específico

O peso específico é tido como a razão entre o peso e o volume que uma determinada amostra possui.

$$\gamma_h = \frac{P_h}{V_t} \quad (39)$$

Onde γ_h é o peso específico aparente úmido da amostra, P_h o peso úmido da amostra e V_t o volume total ocupado para essa amostra.

No entanto, na engenharia se trabalha rotineiramente com dois tipos de peso específico: o peso específico úmido, como apresentado acima e que é o que se tem no campo, e o peso específico seco. Normalmente o gráfico resultante do ensaio de

compactação de “Proctor” se trabalha com o peso específico seco no eixo das ordenadas e com o teor de umidade, no eixo das abscissas, ambos em porcentagem. É possível determinar o peso específico seco pela seguinte equação:

$$\gamma_s = \gamma_h \frac{100}{100 + h} \quad (40)$$

Onde γ_s é o peso específico seco e h o teor de umidade.

Sabe-se que uma amostra de solo é constituída pelos seus: agregados (que possuem diferentes granulometrias) e vazios ou poros. Os vazios ou poros podem ser preenchidos pelas partículas sólidas de granulometrias menores, mas mesmo assim ainda existirão espaços vazios que serão preenchidos pelo ar e/ou pela água. Assim sendo, ao se chamar de V_t o volume total de uma amostra de solo, V_s o volume ocupado pelas partículas sólidas, V_a o volume ocupado pelo ar e V_w o volume ocupado pela água, pode-se escrever:

$$V_t = V_s + V_a + V_w \quad (41)$$

Outros parâmetros importantes e que influenciam no peso específico de um solo é o grau de saturação expresso por $S(\%)$ e a porosidade representada por $N(\%)$ e são mostradas pelas Equações (42) e (43) respectivamente:

$$S = \frac{V_w}{V_w + V_a} 100 = \frac{V_w}{V_v} 100 \quad (42)$$

Onde V_v é o volume de vazios.

$$N = \frac{V_v}{V_t} 100 \quad (43)$$

O peso específico de uma mistura asfáltica ou de um solo está ligada ao seu grau de compactação. A metodologia mais usada no Brasil, para a determinação do peso específico máximo, empregada aos solos, foi desenvolvida pelo engenheiro francês Ralph Proctor em 1933, sendo normatizada nos Estados Unidos pela AASHO (*American Association of State Highway Officials*) e no Brasil sua execução segue a norma da ABNT (ABNT, 1986).

Proctor (1933) observou que ao se adicionar água a uma massa de solo o seu peso específico aumentava até atingir um peso específico máximo. Depois disso, o aumento no teor de umidade fazia com que o peso específico do material decrescesse, tendo um aspecto de uma parábola com a concavidade voltada para baixo (Figura 20). Diz-se umidade ótima de um determinado material a umidade em que, no ensaio de proctor, a amostra atinge o seu maior peso específico, ou seja, o seu maior grau de compactação. É importante ressaltar que para o método de Proctor existem três tipos de energia de compactação: normal, intermediária e modificada.

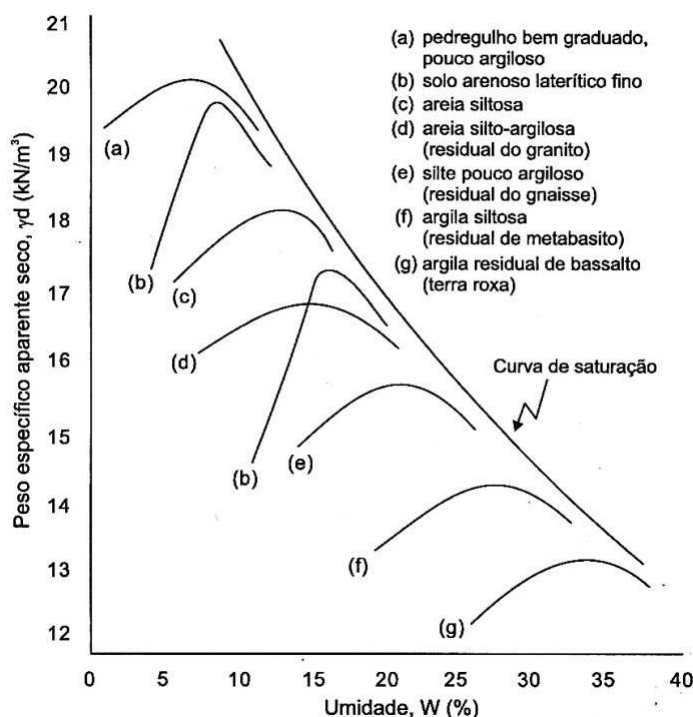


Figura 20. Curva de compactação com a energia de Proctor normal para diferentes tipos de solos (TRINDADE et al., 2008 apud PINTO, 2000).

Em uma análise rápida da Figura 20 pode-se ratificar porque o uso do Georadar em argilas é limitado. As argilas por serem solos com granulometria bastante fina possuem uma área de superfície maior do que solos com granulometrias maiores, retendo assim uma quantidade maior de água, assim sendo, o conjunto eleva sua condutividade elétrica o que ocasiona, nestas condições, um menor alcance de penetração do GPR nestes meios.

No caso de misturas asfálticas a quente o raciocínio é parecido. Até hoje, a dosagem de uma mistura asfáltica tem consistido na escolha, através de

procedimentos experimentais, de um teor dito “ótimo” de ligante, a partir de uma faixa granulométrica predefinida (BERNUCCI, *et al.*, 2008). Uma vez que essas misturas são submetidas a temperaturas que chegam a 170 °C em usinas apropriadas, pode-se considerar para esse tipo de estudo a ausência de água. O betume entra na mistura para fazer o papel de ligante e preencher parte dos vazios.

O teor de ligante asfáltico varia de acordo com o método de dosagem, e é função de parâmetros como a energia de compactação empregada, tipo de mistura, temperatura a qual o pavimento estará submetido, entre outros (BERNUCCI, *et al.*, 2008). O método de dosagem mais usado mundialmente faz uso da compactação por impacto e é denominado método Marshall em referência ao engenheiro Bruce Marshall que o desenvolveu na década de 1940 (BERNUCCI, *et al.*, 2008). No Brasil o método de dosagem Marshall de misturas asfálticas ainda é o mais utilizado e seu método de ensaio está presente na norma do DNER-ME 043/95 (DNER, 1995).

A idéia básica por de trás das medidas das constantes dielétricas é que a compactação nos pavimentos reduz o volume de vazios ou índice de vazios contido no material (SAARENKETO, 1997). Assumindo que o teor de betume e as frações dos agregados são constantes, pode-se dizer que o valor dielétrico para os pavimentos varia com a mudança do volume de vazios, ou seja, o valor dielétrico cresce com o aumento do grau de compactação empregado (SAARENKETO, 1997). Este princípio é ilustrado na Figura 21 a seguir.

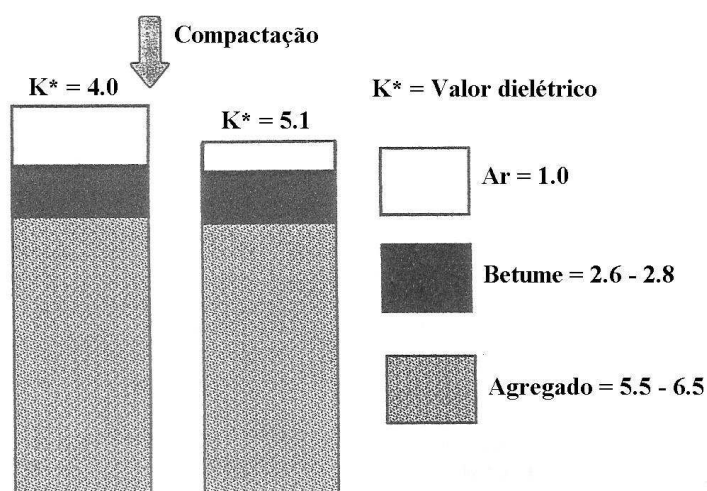


Figura 21. Princípio do efeito da compactação sobre a dieletricidade do pavimento (SAARENKETO, 1997).

2.3 Aquisição dos dados

Ao se realizar levantamentos com o Georadar, deve-se levar em conta não somente as suas potencialidades, mas também suas limitações no que tange ao ambiente de investigação dificultando a aquisição dos dados, como: áreas muito arborizadas, locais íngremes, locais de difícil locomoção das antenas, dentre outros.

Para facilitar a interpretação dos dados é necessário, que durante sua aquisição no campo, ter claro o objetivo da prospecção para um melhor planejamento da coleta de dados. *“É importante observar e anotar cuidadosamente as condições ao redor da área de pesquisa que podem influenciar nos registros ocasionando ruídos no radargrama. Alguns exemplos de anotações que são convenientes durante a aquisição de dados no campo são, entre outras: a rugosidade da superfície sobre a qual desliza a antena, a existência de possíveis refletores externos ao longo do perfil efetuado (em qual ponto do perfil se encontra, e qual é a distância mais próxima entre a antena e o elemento anômalo), a existência de redes elétricas de alta tensão, trocas de material superficial, eventos que possam ocorrer durante o deslocamento da antena (tropeços do operador, saltos da antena, etc), escadas, tubulações”* (AGUIAR, 2005). Todo tipo de informação que se tenha é de suma importância para eliminar possíveis erros e ajudar na calibração e interpretação dos dados do GPR como: dados de sondagens e de geologia por exemplo.

Fundamentalmente o *Ground Penetrating RADAR* é composto por um gerador de sinal e uma antena que emite e recebe o sinal (*sistema mono-estático*) ou um par de antenas, onde uma emite e a outra recebe o sinal emitido (*sistema bi-estático*) (MELO, 2007). Nesta última configuração é possível variar a distância entre as duas antenas (MELO, 2007). Os dados adquiridos podem ser visualizados e gravados em sistemas apropriados, o que possibilita a visualização das reflexões dos sinais obtidos durante as medidas de campo.

“A técnica de aquisição dos dados ou modos de operação do GPR não difere muito do levantamento sísmico de reflexão convencional. Podem ser discriminadas em três tipos: (i) perfis de reflexão com afastamento constante (Figura 22), em que se utiliza uma antena mono-estática ou então um par de antenas bi-estáticas separadas por uma distância fixa (offset comum); (ii) sondagens de velocidade

(utilizadas para estimar a velocidade das ondas de RADAR no solo) que incluem a técnica WARR (wide angle reflection and refraction) com a qual uma antena é mantida fixa enquanto a outra é deslocada (Figura 23); (iii) a técnica CMP (Common Mid Point), segundo a qual ambas as antenas são deslocadas simetricamente em relação a um ponto central (Figura 24); (iv) e os modos de transluminação ou tomografia, que consistem em colocar as antenas transmissora e receptora em dois poços adjacentes, cada uma em um poço” (MELO, 2007). A Figura 25 mostra uma inspeção realizada por esse último método em uma viga de concreto armado.

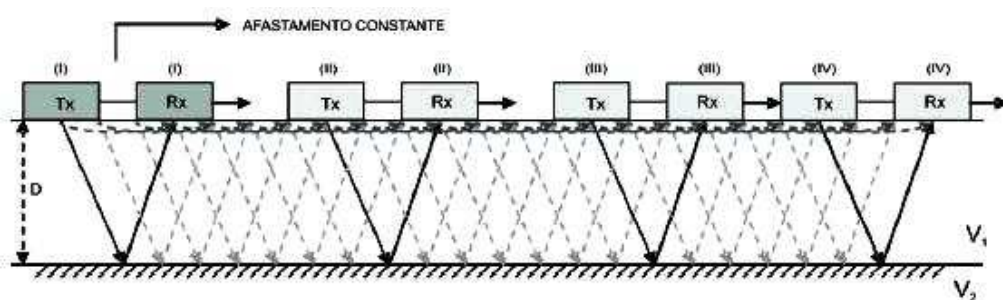


Figura 22. Modelo de aquisição Normal, afastamento comum ou “off-set” comum (MELO, 2007)

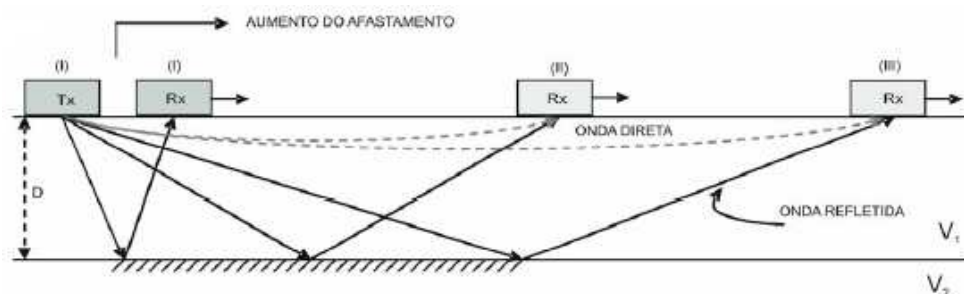


Figura 23. Modelo de aquisição WARR (Wide Angle Reflection and Refraction) (MELO, 2007)

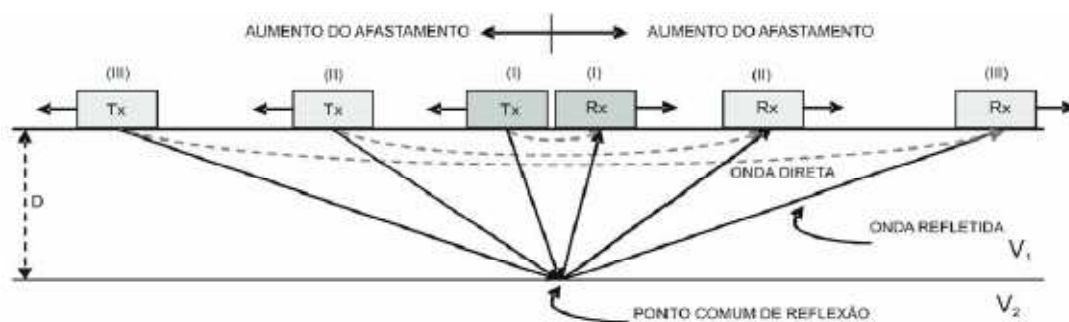


Figura 24. Modelo de aquisição CMP (Ponto Médio Comum) (MELO, 2007).

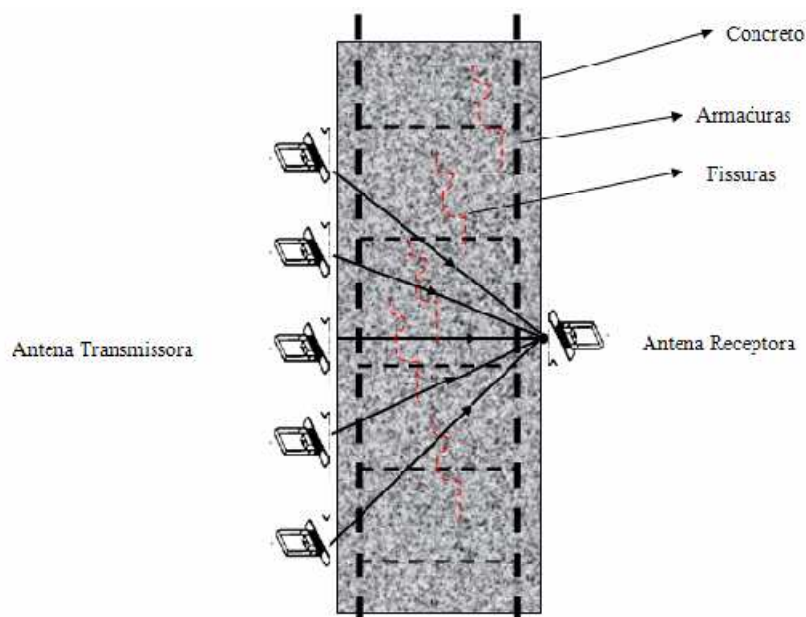


Figura 25. Transiluminação aplicada a uma peça de concreto armado fissurada (Adaptada de ANNAN, 1992).

2.4 Tratamentos dos dados do GPR

Segundo Fonseca (2000), o interesse nos métodos de Processamento Digital de Imagens (PDI), surgiu com a necessidade de melhorar a qualidade da informação “*pictorial*” da imagem para facilitar a interpretação pelo analista. Em geral, PDI é a manipulação de uma imagem por computador de maneira que tanto a entrada quanto a saída sejam imagens (SPRING, 1996).

O principal objetivo de se aplicar o processamento digital no tratamento de imagens de GPR é melhorar a visualização de certas feições para o analista e fornecer outros elementos para auxiliar na sua interpretação, inclusive gerando produtos (radargramas) que possam ser posteriormente submetidos a outros tipos de processamentos (CROSTA,1992). Além de tornar possível o estudo da cena nas várias regiões que compõem o espectro eletromagnético, as técnicas de processamento digital de imagens também tornam possível a integração de diversos tipos de informações, desde que estes dados estejam corretamente registrados, ou seja, estejam num mesmo sistema de coordenadas e que as coordenadas das feições identificadas na imagem correspondam com a de campo (FONSECA, 2000).

Segundo Fonseca (2000), o pré-processamento, o realce e a análise de imagens são etapas que constituem o PDI e são descritas nos itens 2.4.1, 2.4.2 e 2.4.3 respectivamente.

2.4.1 Pré-processamento

Está presente na etapa de “pré-processamento” a restauração quantitativa da imagem, com a finalidade de corrigir as deteriorações advindas das influências radiométricas e geométricas inseridas pelo sensor. No caso de sensores orbitais essas influências radiométricas são devidas principalmente ao processo de absorção e espalhamento do sinal pelas camadas que constituem a atmosfera que influenciam no nível de cinza (ganho); enquanto as influências geométricas são devidas principalmente pela rotação da terra e pelo campo de visada dos sensores que trabalham a nadir, então faz com que a imagem obtida por estes sensores fiquem distorcidas (FONSECA, 2000). Levando em consideração os sensores de GPR (antenas), não se tem a interferência da atmosfera mais existem distorções advindas das propriedades dielétricas de cada material que de certa forma influenciam na intensidade do nível de cinza do “radargrama”. Segundo Dourado (2004), as influências geométricas são oriundas dos efeitos da propagação das ondas na sub-superfície e podem ser corrigidas pela técnica de transformação geométrica onde o refletor é posicionado corretamente no espaço X, Y e Z (Migração).

Faz-se nesta fase uma análise visual verificando a presença de reflexões oriundas da sub-superfície, a presença de ruídos grosseiros, como o caso de ruídos provenientes de redes elétricas, reflexões provenientes da superfície, seja de corpos metálicos ou de outros objetos (DOURADO, 2004). Também é nesta etapa que é feita a edição do radargrama, sendo possível corrigir erros do cabeçalho, melhorar a apresentação, mudar o contraste das “linhas de varreduras” (traço obtido através do pulso emitido), acrescentar informações sobre a topografia do terreno e, se necessário, retirar as “linhas de varreduras” de má qualidade, devido a alguma falha durante a aquisição e também se realiza a redistribuição das “linhas de varreduras” de modo a se ter uma escala horizontal uniforme (MELO, 2007).

2.4.1.1 Ganhos

Tem por objetivo dar um ganho às amplitudes dos sinais registrados. Como o sinal sofre uma atenuação no subsolo devido as suas propriedades dielétricas, às vezes, para uma melhor visualização dos dados, é necessário aplicar algum tipo de função de ganho (linear, exponencial, dentre outros) para realçar e compensar as perdas de amplitudes correspondentes aos refletores em maiores profundidades nas imagens de RADAR. É bom ressaltar que quando se aplica essa ferramenta o ganho é aplicado a toda imagem, inclusive realçando os ruídos.

2.4.1.2 Transformação geométrica

A transformação geométrica, também conhecida como migração, tem por objetivo posicionar corretamente os refletores quanto a sua posição, mergulho e profundidade. Aqui os dados registrados e processados no domínio $(x - t)$ (espaço - tempo), são transferidos para o domínio $(x - z)$ (espaço - profundidade); no entanto, é necessário conhecer a velocidade de propagação da onda de RADAR no sub-solo (POPINI, 2001). A correção geométrica tenta corrigir a geometria de feições em sub-superfície, principalmente no que diz respeito aos ângulos de mergulho, dimensões, curvaturas e correto posicionamento em relação à superfície, das interfaces (DOURADO, 2004).

2.4.2 Realce

O “realce” das imagens é uma análise qualitativa, é a fase onde se preocupa com que o melhoramento da qualidade visual da imagem seja melhor discernível pelo analista e tem-se como resultado uma imagem transformada e melhorada. Fazem parte dessa fase etapas como o realce de contraste e filtros, presentes tanto nas imagens orbitais quanto nos “radargramas”, além da análise de componentes principais presente nas imagens orbitais. No contraste, o novo valor do *pixel* depende apenas do valor antigo do mesmo pixel, enquanto que no processo de filtragem o valor numérico que o pixel assume depende também dos valores numérico dos pixels vizinhos (FONSECA, 2000).

2.4.2.1 Contraste

Segundo Fonseca (2000) este processo não acrescenta informação à imagem, apenas torna mais nítida a percepção de suas feições. Esta técnica é utilizada quando os valores de NCs que representam a cena estão agrupados e não distribuídos por todo intervalo possível. Um sensor que possui 8 bits para discretizar cada pixel, possui 256 valores de NCs possíveis distribuídos numa escala de 0 a 255. Quando se tem valores muito próximos (agrupados) para representar a cena, por exemplo, de (200 a 255) ao invés de ocupar toda a escala possível (0 a 255), isso dificulta a interpretação dos dados por parte do analista e diz-se que a imagem possui um baixo contraste. O contraste de uma imagem pode ser facilmente avaliado pela análise de seu histograma e melhorado com o emprego de funções que podem ser lineares e não-lineares. No caso dessa dissertação o “radargrama” será convertido numa imagem de 8 bits para seu processamento.

2.4.2.2 Filtros

Na utilização de filtros, o novo nível de cinza de um pixel após a transformação, depende do valor do nível de cinza original do pixel e de outros pixels ao seu redor (operação de vizinhança), os quais contribuem para o novo valor de nível de cinza. As operações de filtragem podem ser divididas em duas classes: filtragem linear e filtragem não-linear. A filtragem linear pode ser realizada no domínio do espaço (convolução) em imagens orbitais, no domínio do tempo em imagem de GPR, e no domínio da frequência (operação produto) em imagens orbitais e de GPR (FONSECA, 2000).

De uma maneira geral os dados de GPR obtidos em campo vêm com ruídos superpostos ao sinal de interesse por causa de reflexões oriundas de elementos externos ao meio em estudo, como por exemplo, redes elétricas, o tipo de superfície onde se desliza a antena, a própria antena dentre outros (JULIO, 2005).

Os filtros mais utilizados para tratamento de dados GPR, segundo Dourado (2004), são os filtros de frequência e o de deconvolução, descritos a seguir.

2.4.2.2.1 Filtros de frequência

“Quando as ondas são emitidas no solo, sejam de natureza sísmica ou eletromagnética, sofrem processos de filtragem durante sua passagem pela sub-superfície. Embora os dados sejam emitidos e coletados com frequência central específica, o registro dos sinais incluem uma banda de frequência ao redor da frequência dominante. Um filtro de frequência remove frequências indesejáveis, altas e/ou baixas, produzindo uma imagem de GPR mais limpa e muitas vezes com maior resolução. Um filtro passa-alta mantém as altas frequências do sinal, removendo as componentes de baixa frequência. Nos estudos com o radar, a filtragem DC corresponde à aplicação de um filtro passa-alta no intuito de remover frequência muito baixas, associadas à saturação eletrônica do receptor e provenientes das altas energias das ondas aéreas e terrestres. Já o filtro passa-baixa, remove as altas frequências deixando apenas as componentes de baixa frequência. Uma combinação destes dois efeitos pode ser obtido com um filtro passa-banda, onde o filtro retém todas as frequências num intervalo específico, removendo aquelas externas ao mesmo. É possível avaliar o espectro de amplitude dos dados e detectar a faixa de frequência onde as amplitudes são maiores e projetar um filtro que preserve a banda de frequência de interesse” DOURADO (2004).

2.4.2.2.2 Filtro de deconvolução

A deconvolução é o processo inverso ao da convolução e tem o objetivo de melhorar os registros (temporal) para facilitar a interpretação do Analista. O traço registrado pela antena receptora do GPR depende das respostas da antena emissora e receptora de sinal, dos efeitos de filtragem que minerais presentes no solo exercem durante a propagação do sinal e do pulso inicial. Partindo no princípio que o sinal recebido não é o mesmo que o emitido pelos motivos descritos acima, tornasse possível representar o sinal registrado como uma convolução entre o sinal inicial, os efeitos do subsolo e o ruído (AGUIAR, 2005).

2.4.2.2.3 Remove background

É um filtro utilizado para a remoção de ruídos de fundo na imagem, mas pode causar a remoção de refletores contínuos. Ele toma a média de todos os traços em uma seção e a subtrai de cada traço. O uso de filtros de remoção de ruídos de fundo é um passo fundamental no processamento e interpretação de dados GPR em meios atenuantes (por exemplo, solos úmidos). Nesses ambientes, as antenas de contato, em camadas mais rasas, perto da superfície, podem causar reverberação significativa podendo mascarar os sinais (JOL, 2009).

2.4.3 Análise de imagens

“Esta fase está relacionada com a extração de informação de imagens. Inclui a segmentação (partição da imagem em regiões com características diferentes) e classificação de imagens (segmentação específica usando técnicas de reconhecimento de padrões). O resultado de uma operação de análise de imagem é uma descrição da imagem de entrada (lista de propriedades do objeto: posição, tamanho, formato), um campo vetorial representando o movimento de objetos em uma seqüência de imagens, mapas, ou uma representação gráfica. A descrição pode ser simplesmente o nome da classe a que o objeto pertence” (FONSECA, 2000). Nesta dissertação será usado o classificador MaxVer (máxima verossimilhança) e será descrito de forma resumida no item 3.2.5.2.

Este tema é mais amplamente discutido por alguns autores como (POPINI, 2001; AGUIAR, 2005) e numa linha de pesquisadores em imagens orbitais, que segue o mesmo princípio, estão nomes como (VIEIRA, 2000; FONSECA, 2000; MATHER, 2004).

2.5 Transformada Wavelet

Segundo Ferreira (2010), com o aparecimento das técnicas de processamento digital de imagens, a Transformada *Wavelet* tem se mostrado como uma boa alternativa em relação à Transformada de Fourier.

A Transformada de Fourier de um sinal contínuo apresenta algumas deficiências, dentre elas é que como ela não está no domínio do espaço ela não representa bem as mudanças de sinal neste domínio. Ou seja, embora seja possível determinar as frequências de um sinal, não se sabe exatamente onde elas aparecem. Como em muitos casos a parte mais significativa de um sinal é sua característica não estacionária, (as propriedades do sinal mudam com o tempo, como: inclinações, tendências, mudanças súbitas e inícios e fins de eventos), isso é apontado como um ponto negativo (CASTAÑÓN, 2003).

O grande potencial das *Wavelets* é a habilidade de realizar análises locais, ou seja, ela consegue isolar e avaliar em detalhes uma pequena região de um determinado sinal, tornando possível a revelação de aspectos onde outras técnicas de análise de sinal no domínio da frequência ficam a desejar (CASTAÑÓN, 2003).

Na literatura é possível encontrar uma série de transformadas para se trabalhar com imagens. A transformada *wavelet* converte a imagem para domínio da frequência, possibilitando a análise desta através das frequências de seus elementos. Ela decompõe um sinal em bandas de diferentes frequências; no caso da aplicação que interessa a este trabalho, este sinal é um radargrama. Essa decomposição é chamada decomposição *wavelet*. A decomposição *wavelet* acontece com base na aplicação de dois tipos distintos de funções: as *wavelets* e as funções de escala, sendo que as *wavelets* são filtros digitais passa-altas e as funções de escala são filtros digitais passa-baixas.

A *função de escala pai* é um filtro passa-baixa original da transformada *wavelet*. A *função de escala* é o filtro obtido a partir de uma função de escala pai através de operações de dilatação e translação. *Wavelet-mãe* é um filtro passa-alta original da transformada *wavelet*. *Wavelet* é o filtro obtido a partir de uma *wavelet-mãe* através de operações de dilatação e translação. Também é utilizado para denominar o par formado por uma *wavelet-mãe* e uma função de escala pai (DÓCUSSE, 2008).

O sinal é decomposto pela transformada *Wavelet* através de uma série de funções elementares, originadas a partir de escalas e translações de uma função base (Equação 44), na qual t é o tempo e a é o parâmetro de escala (também chamado de

dilatação) podendo aumentar (se $a > 1$) ou diminuir (se $a < 1$) a *Wavelet* formada pela função. Já b é o parâmetro de translação, indicando que a *Wavelet* foi transladada no eixo t de uma distância equivalente a b . A função $\psi_{1,0}(t)$ ($a = 1$ e $b = 0$) é chamada de *Wavelet* mãe, enquanto as outras funções $\psi_{a,b}(t)$ recebem o nome de *Wavelets*. O termo $\left(\frac{1}{\sqrt{a}}\right)$ é um fator de normalização da função *Wavelet* (FERREIRA, 2010).

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (44)$$

Nesta equação, os parâmetros a e b variam continuamente em \mathbb{R} (Reais), $a \neq 0$.

Existem vários tipos de *wavelets* citadas na literatura. O uso de um tipo ou outro está ligado à aplicação. Vários pesquisadores estão propondo regras para a construção das *wavelets* de acordo com as necessidades de aplicação. Com isso é de se esperar que surja uma infinidade de diferentes *wavelets*, e particularmente construir um conjunto de *wavelets* adequado ao processamento de um tipo de sinal ou aplicação específica, levando à obtenção de resultados melhores (FARIA, 1997). A seguir são descritas alguns tipos de *wavelets*:

- ✓ **Bases *wavelets* ótimas**, que fornecem a decomposição mais compacta de um sinal (MEYER, 1993);
- ✓ **Beylkin**, estes filtros possuem raízes na proximidade da frequência de Nyquist (WICKERHAUSER, 1994);
- ✓ **Daubechies**, são uma família de funções caracterizadas pelo seu nível de localização espacial *versus* suavidade. Possui suporte compacto e suavidade “regulável” (DAUBECHIES, 1992);
- ✓ **Coiflets**, dotadas de momentos nulos não só na função *wavelet*, mas também na função escala. Tem como vantagem o fato dos coeficientes de aproximação poder ser representados pelas amostras do sinal, no entanto, a ordem dos filtros torna-se elevada (WEI *et al.*, 1997);
- ✓ **Coifman**, os “filtros foram projetados tal que tanto a *wavelet* quanto a função escaladora tenham momentos nulos” (JIANG e GUO, 2004);

- ✓ **Haar**, é a mais simples de todas, também pode ser considerada uma D2 (Daubechies 2): a primeira *wavelet*, com um único momento nulo (VETTERLI e HERLEY, 1992);
- ✓ **Meyer**, onde a *Wavelet* e a função escala estão definidas no domínio da frequência. Derivam das chamadas *wavelets* de Shannon, ou Sinc *wavelets*, que são suavemente enjaneladas na frequência tal que o decaimento no tempo (t) possa ser mais rápido que qualquer potência de (t) (MEYER, 1993);
- ✓ **Malvar**, *wavelets* ortonormais cuja descoberta se insere na estrutura geral de referência da análise enjanelada de Fourier, vindo a constituir um algoritmo de análise em tempo-frequência, em oposição à análise tempo-escala (MEYER, 1993);
- ✓ **Morlet**, não possui função escala, porém é explícita (FERREIRA, 2010);
- ✓ **Mexican Hat**, também não possui função escala, nas não é explícita (FERREIRA, 2010).
- ✓ **Vaidyanathan**, cujo filtro exhibe reconstrução exata apesar de não satisfazer nenhuma condição de momentos, incluindo a normalização (WICKERHAUSER, 1994);
- ✓ **Wavelets biortogonais**, para as quais a restrição da ortogonalidade é enfraquecida. Apresenta a propriedade de fase linear, necessária na reconstrução de sinais e imagens. Utiliza duas *wavelets*, uma para decomposição e outra para reconstrução (MEYER, 1993);
- ✓ **Wavelets simétricas** ou **Simlets**, são *Wavelets* simétricas e foi proposta como uma modificação da *Wavelet* Daubechies, guardando suas características (SILVA, 2007).

2.5.1 Transformada de *Wavelets*: Contínua (TWC) e Discreta (TWD).

Existem dois tipos de funções *wavelets*, as Contínuas e as Discretas, cada qual útil para determinadas aplicações. A contínua é usada principalmente em análise e caracterização de detalhes de sinais. A discreta é mais apropriada para a compressão de dados e reconstrução de sinais (REIGOTA, 2007).

A transformada *wavelet* contínua representa a soma em todo o intervalo de tempo do sinal multiplicado por funções escaladas e transladadas da *wavelet* mãe. Esse processo produz coeficientes *wavelet* $F(a,b)$, que são funções da escala e posição e representam o sinal na base *Wavelet* mãe $\psi_{a,b}$, conforme Equação 45 (FERREIRA, 2010).

$$F(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{a,b}(t) dt \quad (45)$$

Para se calcular todos os coeficientes *wavelet* para cada escala possível é necessário um grande esforço computacional, gerando uma grande quantidade de dados supérfluos, por isso a discretização dos dados é fundamental. Assim, originou-se a *Transformada Wavelet Discreta* (TWD). A TWD escolhe parâmetros de escalonamento (a) e translação (b) discretos (Equação 46), Para a escolhe-se valores inteiros (positivos e negativos), potências de um parâmetro fixo a_0 (REIGOTA, 2007). Nesse caso, o espaço do sinal não é discretizado uniformemente e a escala da *Wavelet* influencia na discretização do parâmetro de translação. Assim, para altas frequências, as *Wavelets* são transladadas por pequenos passos e para baixas frequências, a translação é feita com passos maiores (FERREIRA, 2010).

$$a = a_0^{-j}, \quad \text{onde } a_0 > 1 \text{ e } j \in Z \quad (46)$$

Onde Z é o conjunto de números inteiros não nulos, enquanto as diferentes larguras assumidas pelas *wavelets* são atribuídas aos diferentes valores de j .

A discretização do parâmetro b depende do valor assumido de j . As *wavelets* de altas frequências são transladadas por pequenas distâncias a fim de cobrir todo o

domínio do tempo, enquanto que *wavelets* de baixas frequências são transladadas por uma distância maior (REIGOTA, 2007).

$$b = kb_0a_0^{-j}, \quad \text{onde } b_0 > 0, \text{ fixo}, j, k \in Z \quad (46)$$

A *wavelet* discreta fica então:

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{\frac{j}{2}} \psi(a_0^j t - kb_0) \quad (47)$$

A Figura 26, a seguir apresenta uma comparação entre a aplicação da TWC e TWD sobre um determinado sinal analisado Figura 26(a).

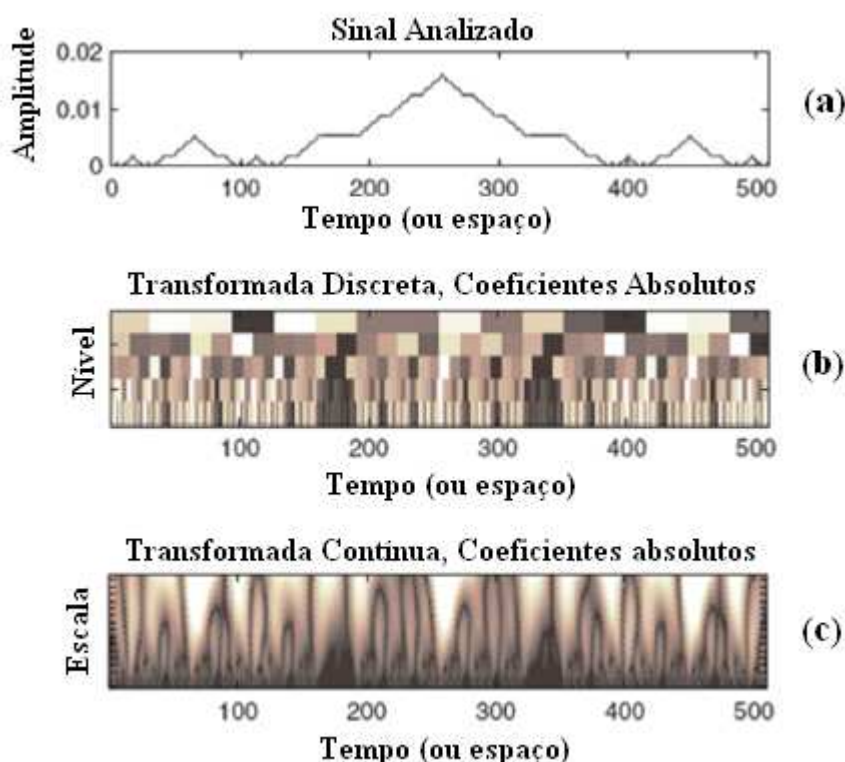


Figura 26. Comparação entre a TWC e TWD aplicadas a um sinal. Fonte: (MISITI et. al., 2006)

A representação gráfica das análises discretas: apresentada na Figura 26(b), mostra o tempo sobre o eixo das abscissa e na ordenada uma escala diádica: 2^1 , 2^2 , 2^3 , 2^4 e 2^5 (de baixo para cima), os níveis são de 1, 2, 3, 4 e 5. Cada coeficiente de nível k é repetido 2^k vezes. A representação gráfica de uma análise contínua, apresentada na Figura 26(c), traz o tempo sobre abscissa e a escala sobre o eixo das ordenadas variando quase continuamente entre 2^1 e 2^5 com intervalo de 1 unidade (de baixo para cima) (MISITI et. al., 2006).

2.5.2 Aproximações e Detalhes

Uma forma de se calcular os coeficientes da *Transformada Wavelet Discreta*, é através da aplicação na decomposição de imagens. A análise da *wavelet* consiste em aproximações e detalhes. As aproximações representam os componentes de baixa frequência do sinal. Os detalhes são as componentes de alta frequência do sinal.

Segundo Ferreira (2010), a análise de *wavelet* aplicada à filtragem de imagens pode ser implementada a partir de um Banco de Filtros, denominados de filtros em Quadratura Conjugada (QMF– *Quadrature Mirror Filters*). A função *wavelet* aplica sobre a imagem um filtro passa-baixa (*L*) e o outro passa-alta (*H*), gerando um nível de decomposição e produzindo quatro sub-bandas (LL, HL, LH e HH), podendo esse processo ser utilizado sucessivamente nas sub-bandas LLs, que seriam os níveis subsequentes de decomposição da imagem original; as sub-bandas LL apresentam as baixas frequências, enquanto HH mostram as altas frequências; as sub-bandas HL e LH representam as frequências intermediárias.

A Figura 27a apresenta uma decomposição em primeiro nível enquanto a Figura 27b apresenta uma decomposição de segundo nível. Segundo Ferreira (2010), têm-se quatro regiões formadas com a metade da resolução espacial da imagem original: a sub-banda LL é uma “imagem de aproximação”, a sub-banda HL é uma “imagem de detalhe horizontal”, a sub-banda LH é uma “imagem de detalhe vertical” e a sub-banda HH é uma “imagem de detalhe diagonal”; no segundo nível de decomposição a sub-banda LL é decomposta em outras quatro sub-bandas com resolução espacial de 25% da imagem original.

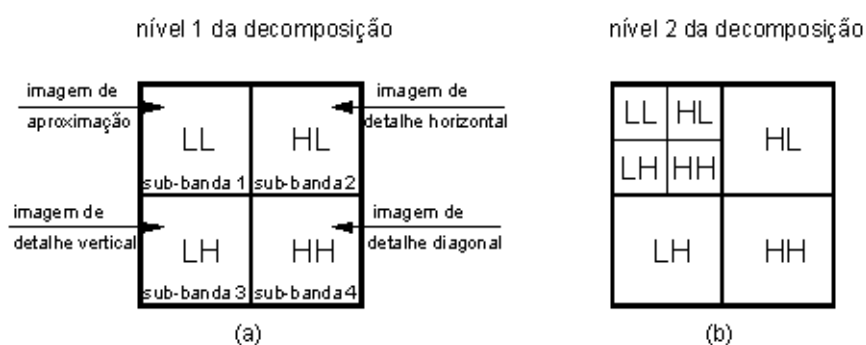


Figura 27. Análise de multirresolução.
 (a) Decomposição “Nível 1”; (b) Decomposição “Nível 2”.
 Fonte: (FERREIRA, 2010)

3. METODOLOGIA

Todos os processos desenvolvidos para alcançar os objetivos deste estudo serão descritos a seguir. As etapas realizadas visam à proposição e a experimentação de duas metodologias, uma para se obter as espessuras das camadas do pavimento obtidas pelo GPR através de um método automatizado e outra para correlacionar o peso específico da camada de um revestimento novo com o seu índice de vazios através da variação do valor dielétrico.

3.1 Estudo das espessuras das camadas de maneira automatizada

Nesta seção, é apresentada uma metodologia para a determinação automatizada das espessuras das camadas do pavimento através da análise dos “radargramas”. Em uma análise visual o processo de discriminação de texturas é um processo relativamente simples, porém quando o objetivo é implementar esse processo de maneira automatizada, isso se torna uma tarefa um tanto árdua. Alguns autores como (FERREIRA, 2010; CASTAÑÓN, 2003) utilizaram a transformada *wavelet* na aplicação em imagens com padrões texturais.

Quando se utiliza qualquer tipo de filtro, as informações originais contidas na imagem são alteradas, ou seja, sua estatística é mudada. Para evitar análises em cima de dados desfigurados, a imagem foi analisada em seu estado bruto. O objetivo desse estudo foi a obtenção de imagens temáticas, representando as camadas de *off-set*, revestimento asfáltico, macadame e subleito utilizando um classificador da Máxima Verossimilhança (*MaxVer*). A metodologia empregada consistiu nos seguintes passos:

- 1) Visita a campo para coletas dos dados de GPR;
- 2) Desenvolvimento do algoritmo “mccwfun” utilizado na extração das informações de texturas da imagem através da transformada *wavelet*;
- 3) Interpolação dos coeficientes *wavelets* gerando uma superfície analítica;

- 4) Parametrização dos coeficientes obtidos a partir da superfície analítica, para utilização na etapa de classificação da imagem através do algoritmo *MaxVer*.

3.1.1 Caracterização da área de estudo

A rodovia BR 116 é uma das principais e maiores rodovias brasileiras. Com seus aproximadamente 4385 quilômetros de extensão, corta 10 estados brasileiros e tem início na cidade de Jaguarão – RS, na divisa com o Uruguai e termina na cidade de Fortaleza – CE. A Figura 28 caracteriza toda a rodovia BR 116 e a BR 040. A imagem ampliada à direita mostra o município de Pirai –RJ, local onde foi realizado o experimento para a obtenção das imagens de RADAR para a determinação automatizada das espessuras do pavimento, localizado no km 239+760 da BR 116. A imagem ampliada à esquerda (Figura 28) mostra o município de Sete Lagoas – MG onde foi realizado o experimento de determinação do peso específico da camada de revestimento, localizado no km 470 da BR 040.

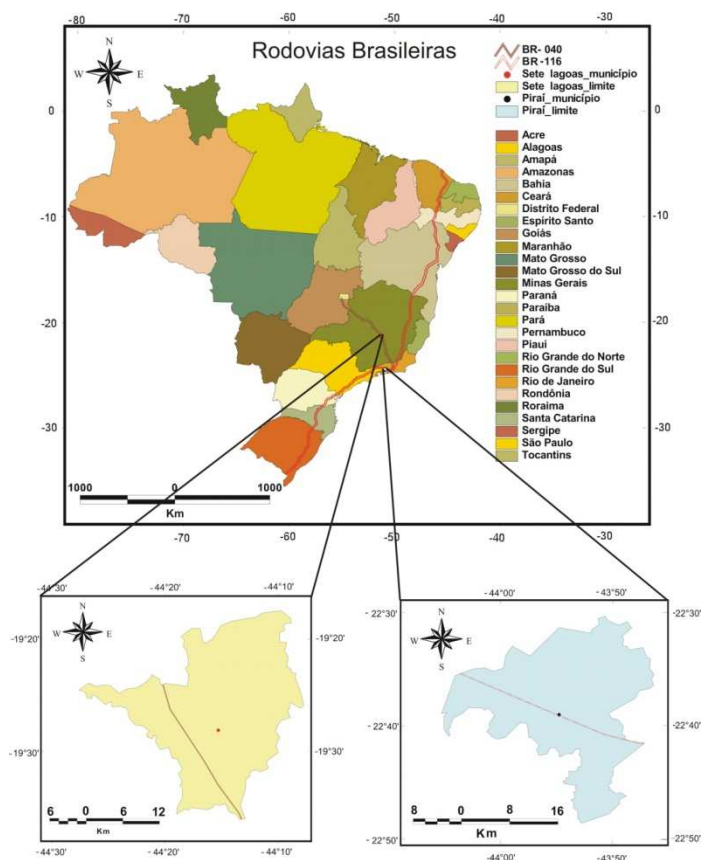


Figura 28. Caracterização da área de estudo: Rodovias BR116 e 040 (Fonte: IBGE).

Para a obtenção dos dados de GPR foi realizada uma visita à BR 116. A região da Rodovia Presidente Dutra escolhida foi o km 239+760, Pista Sul, Faixa 2, situado no município de Pirafá – RJ, onde estava sendo realizado no acostamento uma reconstrução de pavimento. Esta situação de serviço foi escolhida pelo fato de se conseguir visualizar e identificar a estrutura construtiva do pavimento e medi-la de forma direta com o auxílio de trena, situação essa favorável para a primeira etapa do estudo que é de comparar a imagem temática representando as camadas do pavimento, obtida a partir do “radargrama”, com relação às espessuras medidas ao longo de todo o perfil longitudinal do pavimento sondado.

3.1.2 Instrumentação e aparelhagem utilizada

O equipamento GPR utilizado para a aquisição de dados foi o GPR desenvolvido pela GSSI (*Geophysical Survey Systems Inc*) modelo SIR 3000, gentilmente cedido pelo departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa (Figura 29).



Figura 29. Sistema SIR-3000 da GSSI utilizado na aquisição dos dados.

A antena utilizada junto com o sistema SIR-3000 foi uma antena da GSSI modelo 3101A com uma frequência central de 900 MHz (Figura 30), apropriada para profundidade de até 1 metro, pesando 1,3 kg com dimensões de 330 x 180 x 80 mm.

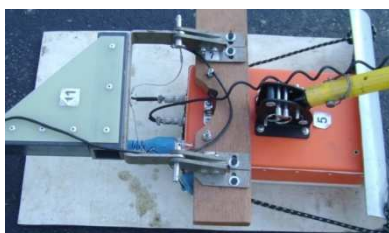


Figura 30. Antena GSSI, modelo 3101A com frequência central de 900 MHz.

Configurações utilizadas na coleta dos dados:

- a) Tipo de amostra: 16 bits;
- b) Número de amostras por varredura: 512;
- c) Taxa de varredura: 50 varreduras/metro;
- d) Formato de arquivo: *.DZT (GSSI).

Para a conversão do “radargrama” do formato (*DZT*) para o formato (*BMP*) foi utilizado o software “*rad2bmp.exe*” desenvolvido pela GSSI (*Geophysical Survey Systems Inc*), cujo download pode ser feito gratuitamente no sítio da Internet: <http://www.geophysical.com/softwareutilities.htm>.

Foi utilizado o software “*ImageJ 1.4g*”, desenvolvido por (*Wayne Hasband National Institute of Health, USA*) em linguagem *JAVA* e disponível gratuitamente no sítio da Internet: <http://rsb.info.nih.gov/ij/download.html>, para visualizar e padronizar a imagem no formato que os programas “*mccwfun4.m*” e “*mccwfun10.m*” fossem capazes de ler, ou seja, a imagem deveria estar em 8 bits e com o número de linhas e colunas múltiplas do tamanho do bloco utilizado.

Para a visualização das imagens foi utilizada a versão demo do software “*Road Doctor Viewer 2.301(c)*” desenvolvido pela *Road Scanners*. Este é um software específico para uso em rodovias. Na sua versão completa apresenta módulos para análises de dados FWD e dados obtidos por câmeras digitais simultaneamente com as informações do GPR. Porém, na sua versão demo há apenas ferramentas de visualização liberadas.

Na etapa de pós-processamento e preparação dos arquivos para a classificação foram utilizados os aplicativos “*mccwfun4.m*” e “*mccwfun10.m*” desenvolvidos, em linguagem Matlab, em parceria, na época, com o doutorando Edgar Ricardo Ferreira. O programa faz percorrer um bloco pela imagem de dimensões 4x4 e 10x10 *pixels* respectivamente, estabelecidas pelo usuário e utiliza a “*Transformada Wavelet*”, (muti- decomposição, nível 1, Daubechies 4), para retornar os coeficientes de aproximação, horizontal, vertical e diagonal. Uma descrição mais sucinta do algoritmo será abordada mais adiante na subseção 3.2.3.

Os programas “*Funcpow.exe*” e “*Transform60.exe*”, desenvolvidos em linguagem C++, foram utilizados para gerar variáveis discriminatórias que representem uma superfície, para posterior emprego na classificação das imagens pelo método Maxver (VIEIRA, 2000).

Para a visualização da imagem temática gerada foi utilizado o software IDRISI Andes, versão 15.0, disponível no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa.

3.1.3 Procedimentos adotados em campo

Para este ensaio foram percorridos continuamente 25 metros longitudinais a 30 e 100 cm da borda da reconstrução e foram realizadas leituras com a trena de 5 em 5 metros ao longo da reconstrução. As Figuras 31 e 32 ilustram o local de estudo.

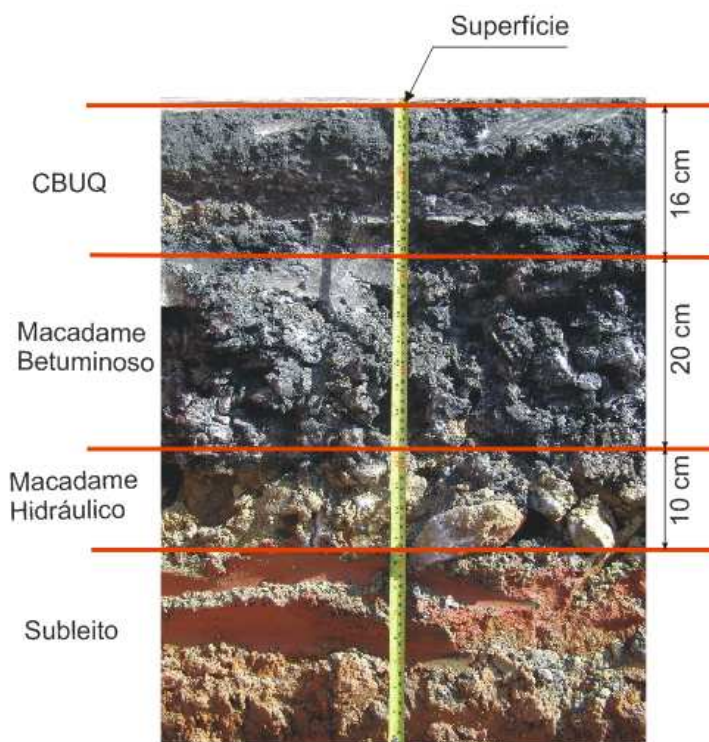


Figura 31. Perfil construtivo da faixa 2, Via DUTRA, Pista Sul, km 239+760, extraído a 1 m do início da reconstrução.



Figura 32. Aquisição dos dados de GPR na Via DUTRA, Pista Sul, km 239+760.

Ao se analisar o perfil construtivo das camadas, foi possível presumir que o perfil de projeto para as camadas de macadame eram de 30 cm no total, sendo cada uma de 15 cm e com os agregados muito semelhantes. No entanto, observa-se, na Figura 31, que a espessura do macadame betuminoso apresenta-se maior que a do macadame hidráulico, variando de 2 a 11 cm a mais dependendo do ponto amostrado. Visto que usualmente não se executam camadas deste tipo com espessuras inferiores a 15 cm por motivos técnicos, uma possível explicação para o fato é que o macadame betuminoso tenha sido executado por penetração direta e o teor de betume aplicado foi suficiente para cobrir toda a camada de macadame betuminoso (15 cm) e penetrar de 2 a 11 cm na camada de macadame hidráulico. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos com a trena ao longo perfil longitudinal.

Tabela 3. Espessuras medidas com a trena.

Distância (m)	Revestimento	Macadame	Macadame	Total ht (cm)
	CBUQ h1(cm)	Betuminoso h2 (cm)	Hidráulico h3(cm)	
01	16	20	10	46
05	17	16	14	47
10	15	20	12	47
15	15	18	12	45
20	16	20	09	45
25	16	20	10	46

A visualização das imagens brutas, obtidas a 30 cm e a 1 metro da borda da reconstrução, são apresentadas respectivamente pelas Figuras 33 e 34. A escala vertical está em tempo (ns) (esquerda), profundidade em metros (direita), e a escala horizontal (distância percorrida) em metros (m). Nota-se, pela análise das Figuras 33 e 34, que a interface entre as camadas de macadame betuminoso e macadame hidráulico não são tão evidentes quando as demais interfaces. Caso tivesse sido utilizada uma antena com uma resolução maior esperava-se que essa interface fosse mais evidenciada. Para efeito de estudo na etapa de classificação, será criada apenas uma classe que será chamada de macadame, representando as classes de macadame betuminoso e macadame hidráulico, pois apesar da Figura 31 mostrar uma boa separação visual entre essas classes, os radargramas (Figuras 33 e 34), apresentam texturas semelhantes. Para uma melhor visualização e interpretação da Tabela 3 e Figuras 31, 33 e 34, é apresentada a Figura 35, mostrando um trecho da reconstrução situado a 1 metro do seu início, onde: a Figura 35b apresenta o aspecto do perfil construtivo, e as Figuras 35a e 35c, apresentam o mesmo trecho do radargrama (escala vertical igual a escala horizontal), a 30 cm e 1 m da borda da reconstrução respectivamente. Nas demais imagens foi utilizado um exagero na escala vertical para efeito de uma melhor visualização dos radargramas e imagens classificadas.

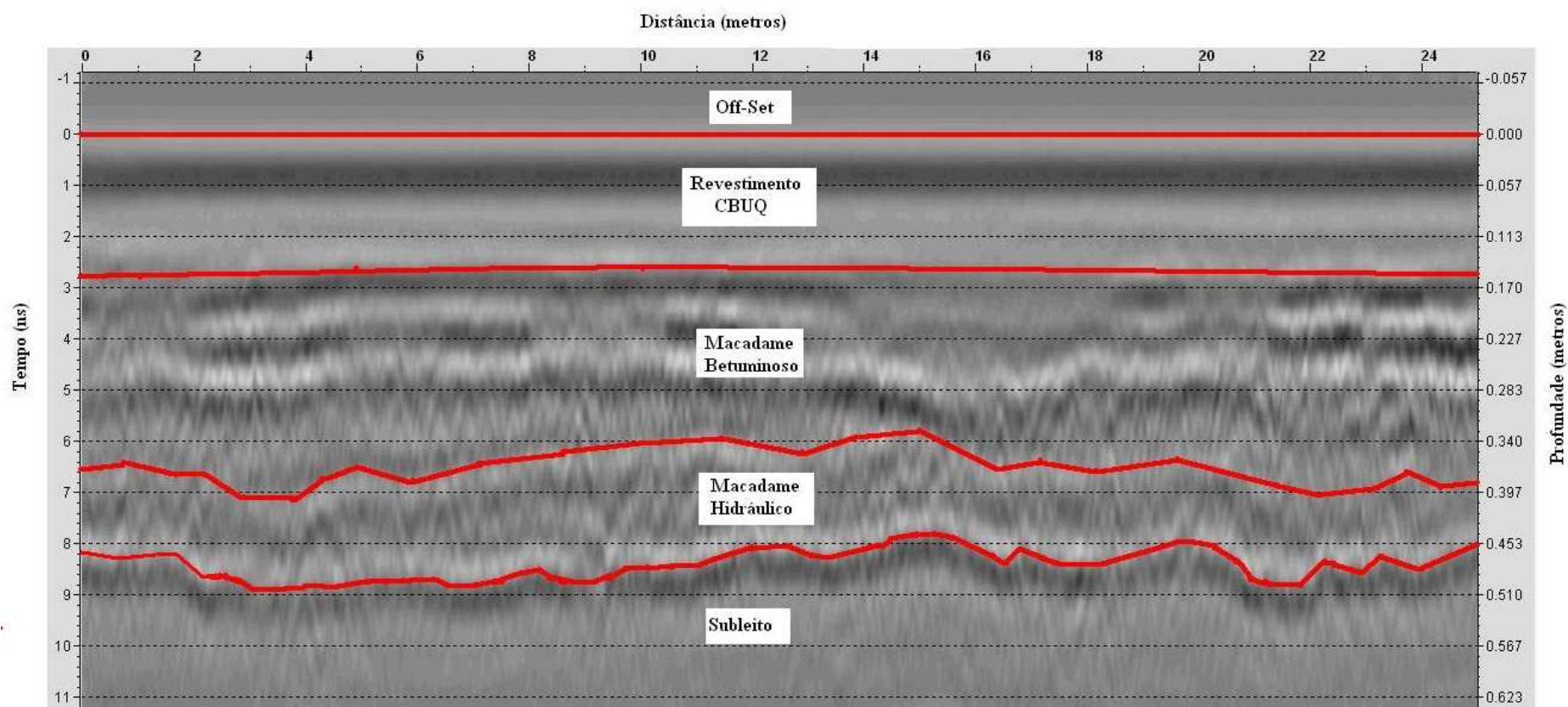


Figura 33. Aspecto do “radargrama”, completo, obtido a 30 centímetros da borda da reconstrução

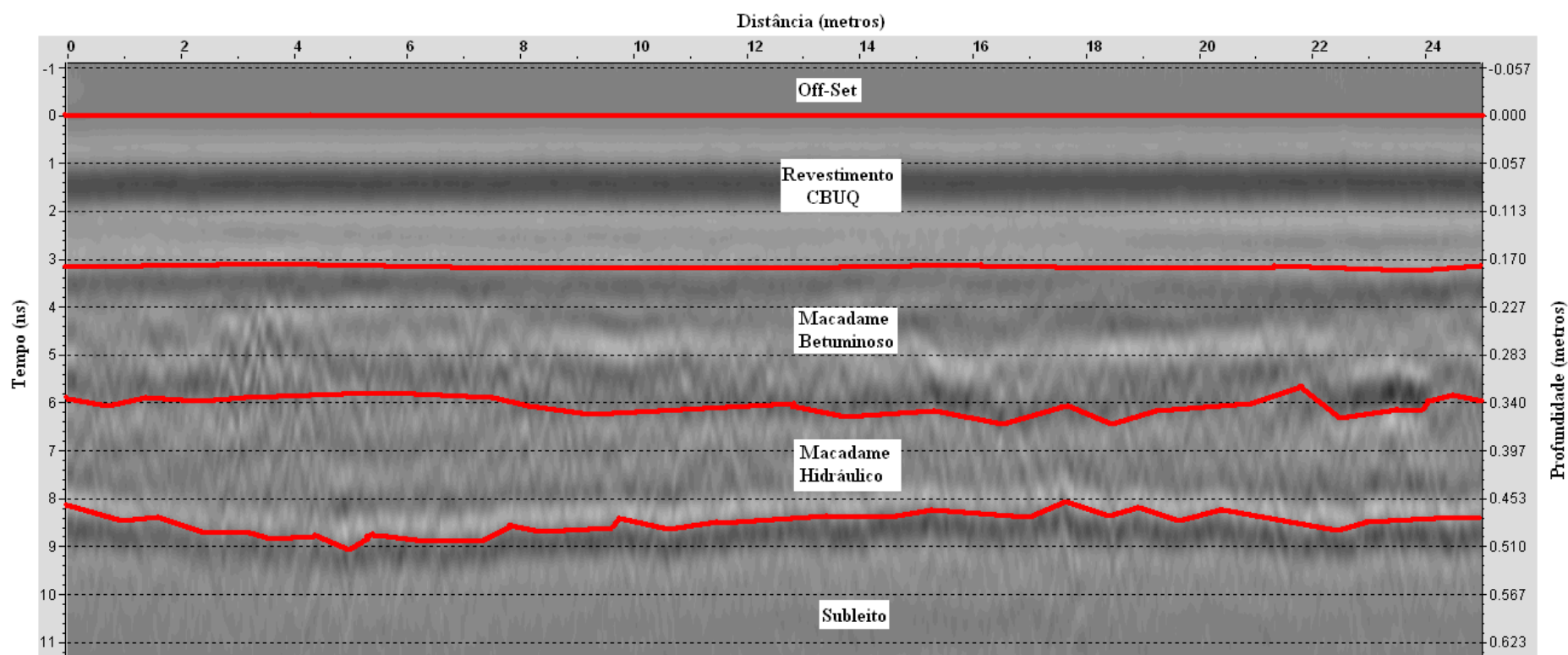


Figura 34. Aspecto do “radargrama” obtido a 100 centímetros da borda da reconstrução.

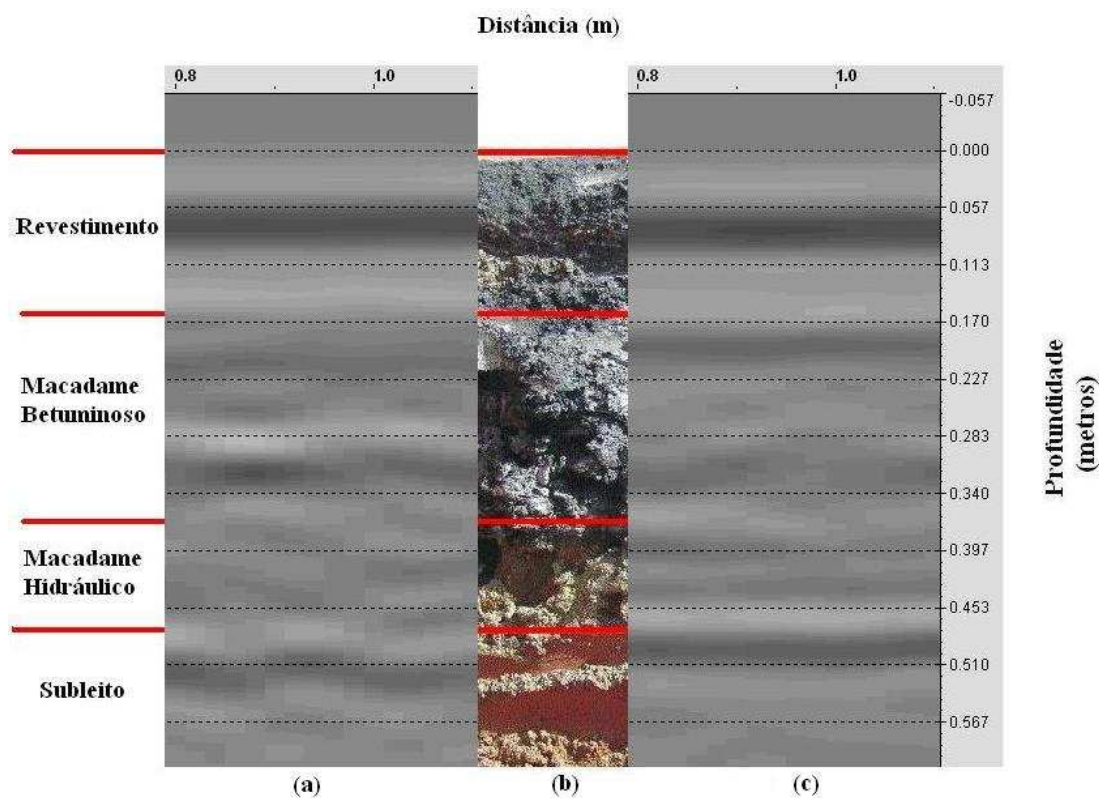


Figura 35. (a) radargrama obtido a 30 cm da borda da reconstrução. (b) aspecto do perfil construtivo. (c) Radargrama obtido a 1 m da borda da reconstrução. Dados coletados a 1 metro do início da reconstrução.

3.1.4 Pré-processamento

O primeiro procedimento foi a utilização do software “*rad2bmp.exe*” desenvolvido pela GSSI para converter a imagem bruta no formato (*.DZT) para o formato (*.bmp) para que fosse possível a integração com o software “*ImageJ 1.4g*”. A imagem resultante após a utilização do “*rad2bmp.exe*” foi uma imagem no formato (*.bmp), na composição RGB e com o número de linhas e colunas iguais às originais, podendo ser ou não múltiplas das dimensões do bloco que se deseja utilizar.

O passo seguinte foi a realização de um re-escalamento da imagem, com o software “*imageJ 1.4g*”, para que a imagem possuísse uma composição 8 bits em níveis de cinza e que o número de linhas e colunas fossem múltiplos da dimensão do bloco escolhido (Figura 36).

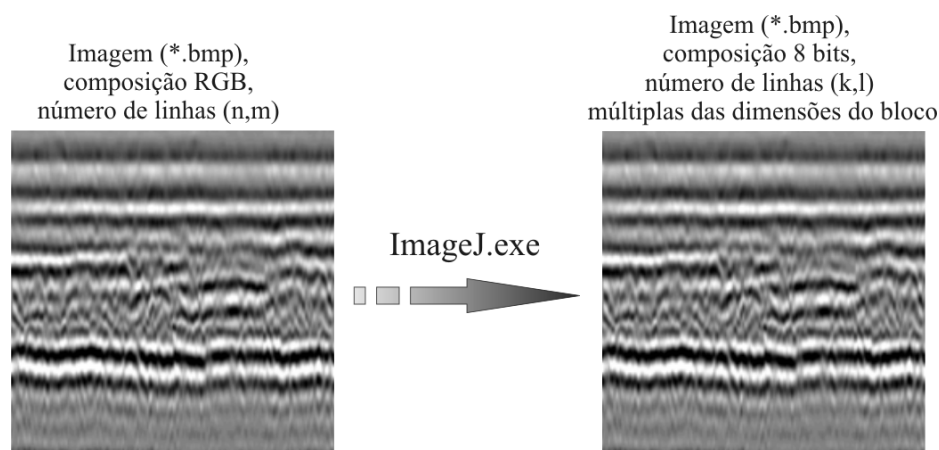


Figura 36. A imagem a esquerda mostra a imagem no estado bruto (*.DZT) e à direita a imagem na composição de 8bits com o número de linhas múltiplos da dimensão do bloco.

3.1.5 Processamento – MCCWFUN.M

Como o “radargrama” apresenta, numa análise visual um padrão de textura, neste trabalho os autores usaram uma metodologia para a extração das características texturais, usando a transformada *wavelet*, muti-decomposição, nível 1, Daubechies 4.

A Figura 37, apresenta as operações realizadas pela rotina “*mccwfun.m*”, para um bloco de tamanho 10x10 pixels. O arquivo de entrada nesta rotina foi uma imagem pré-processada, no formato de 8 bits e com o número de linhas e colunas múltiplas de 4 e 10, que são os tamanhos dos blocos que foram utilizados como unidades de classificação nesta dissertação. A rotina faz percorrer por toda a imagem um bloco de dimensões 4x4 ou 10x10 pixels, onde é aplicada a função “*wavelet*” (muti-decomposição, nível 1, Daubechies 4) e como resultado obtiveram-se os coeficientes *wavelets* (LL, LH, HL, HH). O “*mccwfun.m*” atribui uma coordenada x e y para cada valor de cada coeficiente decomposto pela função “*wavelet*” com o objetivo de espacialização 3D para posterior interpolação dos dados pelo método “*Collocation*”. Em seguida, foi realizado um reescalonamento para que todos os valores, tanto de x e y como para os próprios coeficientes resultantes da transformada “*wavelet*”, estivessem no formato compatível com o software “*transform60.exe*” e por último estes arquivos que contêm informações em 3D foram gerados no formato (*.TSA).

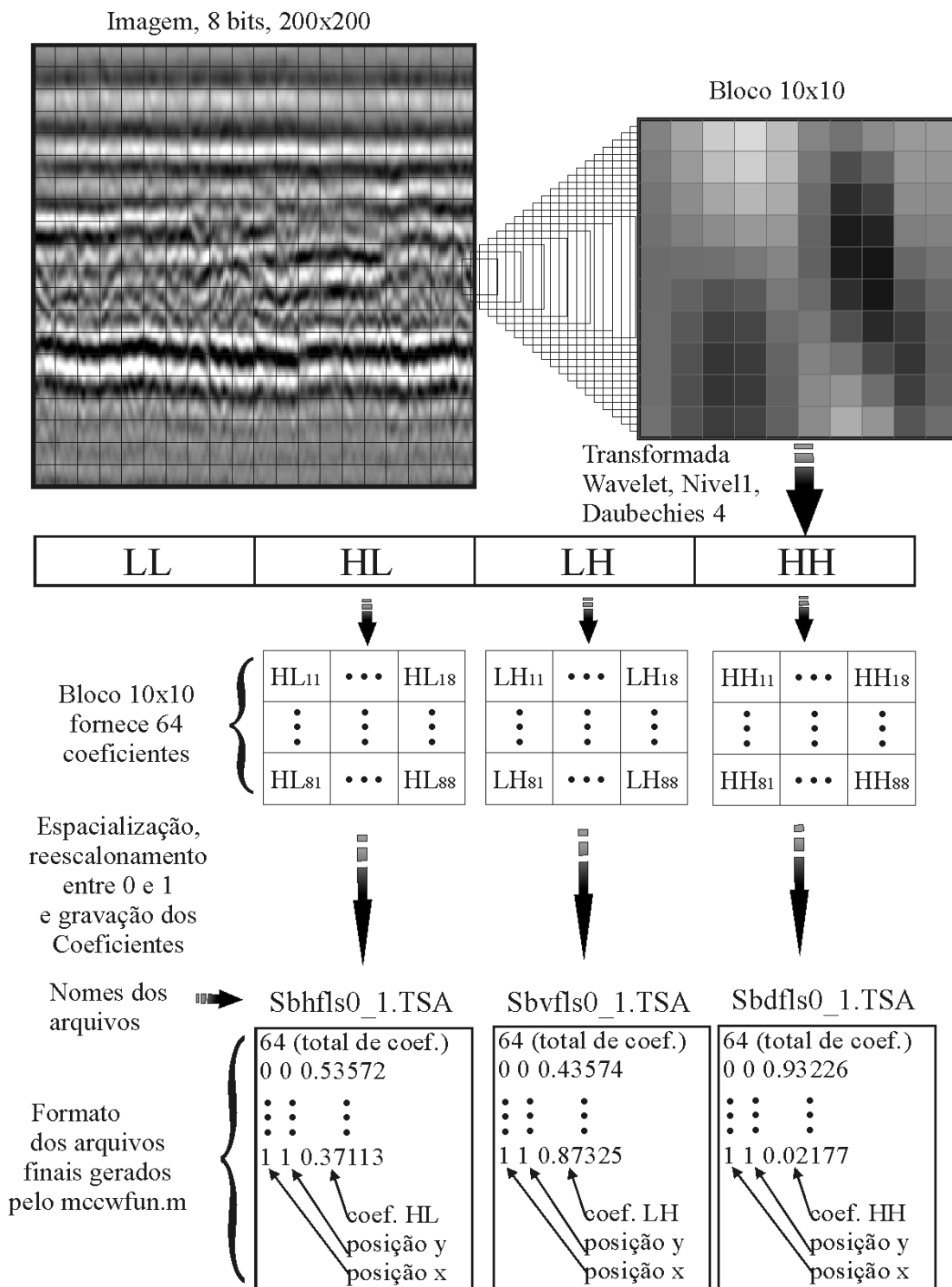


Figura 37. Esquema da rotina “*mccwfun.m*” para bloco 10x10.

O esquema para um bloco de dimensões 4x4 é idêntico, a única mudança é que são gerados 25 coeficientes para cada componente.

Os prefixos “sbhf”, “sbvf” e “sddf” fornecem informações sobre qual componente da “*transformada wavelet*” se referem, significando respectivamente a

componente horizontal, vertical e diagonal. O “0” é usado para representar toda a imagem, enquanto os demais numerais representam as classes que compõem a imagem. No caso deste trabalho, utilizaram 4 classes temáticas (classe 1 = off-set, classe 2 = revestimento, classe 3 = macadame e classe 4 = subleito). O sufixo “_” foi usado para separar os numerais que representam as classes dos numerais contadores dos arquivos. O sufixo “1, 2, 3... m” seguido ao “_” é o contador dos arquivos, indica a posição do bloco sobre a imagem. Para finalizar, o arquivo é salvo com a extensão “TSA” que é de uso exclusivo e obrigatório destes dois programas. O algoritmo do “*mccwfun.m*” para blocos 4x4 e 10x10 estão disponíveis nos apêndices 1 e 2 respectivamente.

Como resultado, para cada bloco 4x4, foram gerados 25 valores para cada coeficiente “LL”, “HL”, “LH” e “HH” e para cada bloco 10x10 foram gerados 64 valores para cada coeficiente “LL”, “HL”, “LH” e “HH”. No entanto, se estará levando em consideração os coeficientes de decomposição horizontal, vertical e diagonal.

3.1.6 Amostras de treinamento e teste

De posse dos arquivos que contêm os coeficientes processados e espacializados, foram separados em arquivos contendo os coeficientes em amostras de treinamento e teste. Foram separadas 150 amostras por classe, sendo 2/3 (100 amostras) destas amostras independentes reservadas para treinamento e 1/3 (50 amostras) reservadas para teste para cada componente da “*transformada wavelet*”.

Para a identificação às quais classes as amostras pertenciam, foram utilizados o “radargrama” para localização das interfaces entre as camadas e de dados obtidos em campo como as medidas efetuadas pela trena. Para isso, foi desenvolvido em linguagem JAVA um aplicativo para auxiliar na aquisição destas amostras como o nome “*selecionar Arquivos*”. Ele escolhe dentro de um intervalo de amostras pré-determinado pelo analista, um número de amostras que serão usadas como amostras de treinamento e teste. Isso se tornou possível neste trabalho, pois se trata de uma imagem de um perfil construtivo de uma rodovia onde se têm as espessuras das camadas variando muito pouco. Foram evitadas as áreas de transição de uma camada

para outra a fim de minimizar o número de pixels de mistura com a intenção de diminuir a confusão durante a classificação.

Resumindo, foi necessário que se identificasse o bloco inicial e final de cada classe, isso foi possível porque eram conhecidas as dimensões do bloco e as coordenadas de tela iniciais e finais de cada classe. Com essas informações, o aplicativo seleciona aleatoriamente um número de amostras escolhido pelo usuário dentro da área formada pela posição do par de blocos escolhidos e renomeia estas amostras com uma numeração seqüencial. Como observado na Figura 38, os retângulos em preto representam o posicionamento inicial e final para cada classe enquanto os retângulos em vermelho mostram a área limitada pelos blocos inicial e final. A linha em azul é a interface entre as camadas que constituem o pavimento. Observa-se também que a zona de transição entre as classes é deixada de fora no momento da confecção dos arquivos de amostras de treinamento e teste por ser uma área que contém muitos pixels de transição o que traz confusão na etapa de classificação. A Figura 39 apresenta a interface do aplicativo.

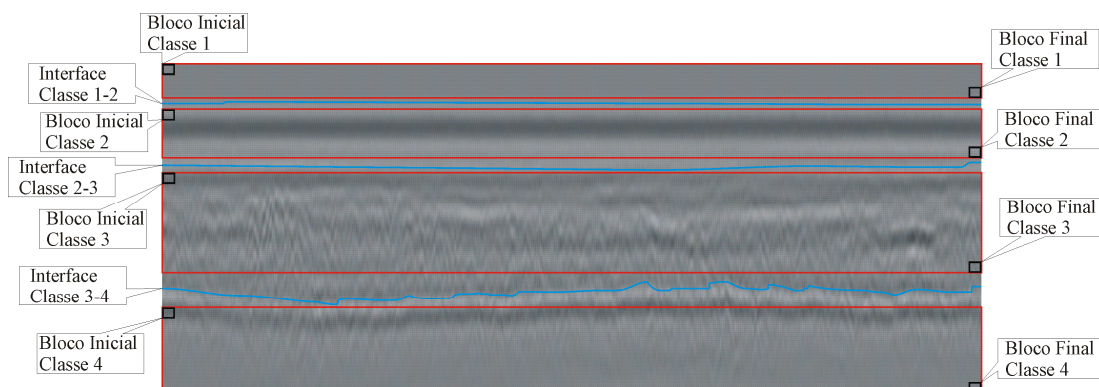


Figura 38. Esquema de funcionamento da rotina “*Escolhe Arquivos*”.

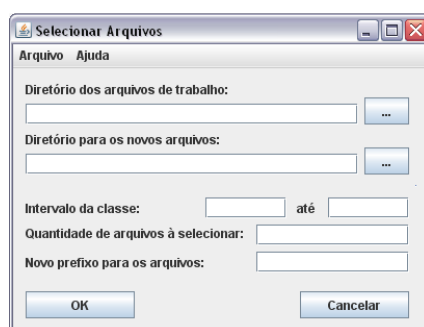


Figura 39. Interface da rotina “*Escolhe Arquivos*”.

3.1.7 Interpolação dos coeficientes *Wavelets*

Em uma classificação tradicional de imagens orbitais, os classificadores tomam suas decisões baseados nas informações de níveis de cinza das bandas que as compõem. No caso da imagem gerada a partir do GPR (radargrama), uma classificação realizada apenas com as informações dos níveis de cinza não seria suficiente. Dentro desta ótica, surge a necessidade de encontrar outra maneira de extrair informações, principalmente utilizando outra unidade de classificação, que não os pixels individualmente, para melhor discriminação das feições de cada classe que constitui a imagem. Optou-se por utilizar blocos de pixels, sobre os quais foram aplicados extratores de textura (*Wavelets*). Neste trabalho, os autores usaram uma metodologia para a extração das características texturais, usando a transformada *wavelet*, multi-decomposição, nível 1, Daubechies 4, pelo fato do “radargrama”, em uma análise visual, apresentar padrões texturais.

Existem pelo menos duas formas de comparar a forma das superfícies analíticas: uma seria diretamente comparando seus valores individualmente em cada ponto dessa superfície, o que seria computacionalmente caro, e a outra seria indiretamente através de seus coeficientes, questão diretamente relacionada com a forma da superfície.

Neste trabalho, foi empregado o método de interpolação “*Collocation*”, para gerar e parametrizar analiticamente uma superfície representativa formada a partir de cada bloco, utilizando os valores fornecidos por cada um dos coeficientes horizontal, vertical e diagonal.

Dessas funções analíticas são extraídos os seus coeficientes para serem usados como variáveis discriminantes no processo de classificação. Espera-se que estas superfícies parametrizadas por seus coeficientes, sejam suficientemente diferentes para que o classificador possa separar as classes informacionais, representando a sub-superfície de pavimentos asfálticos.

O método *Collocation* caracteriza todos os coeficientes *wavelets* de uma cena, representando suas intensidades como uma função da frequência. Cada coeficiente *wavelet* pode ser representado no espaço tridimensional com as distribuições no espaço assumindo os eixos *X* e *Y*, e frequência no eixo *Z* (coeficientes *wavelets*).

Uma superfície analítica é interpolada através dos pontos de controle, os quais podem ser irregularmente espaçados. O método *Collocation* foi utilizado para gerar e extrair os parâmetros das superfícies analíticas. Então, os coeficientes das funções polinomiais que representam estas superfícies, são usados como vetores de entrada para serem utilizados em diferentes classificadores supervisionados (VIEIRA, 2000).

Dada as observações $z(P_i)$ para uma gama de posições P_i distribuídas espacialmente, sistemas de equações lineares são montadas e resolvidas para os coeficientes a_i . A seguir é feita uma ilustração para quatro pontos, mas qualquer quantidade de pontos pode ser usada (VIEIRA, 2000).

$$\begin{vmatrix} e_1 & C(P_1P_2) & C(P_1P_3) & C(P_1P_4) \\ C(P_2P_1) & e_2 & C(P_2P_3) & C(P_2P_4) \\ C(P_3P_1) & C(P_3P_2) & e_3 & C(P_3P_4) \\ C(P_4P_1) & C(P_4P_2) & C(P_4P_3) & e_4 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} z(P_1) \\ z(P_2) \\ z(P_3) \\ z(P_4) \end{vmatrix} \quad (44)$$

$$\text{Onde } C(P_iP_j) = \sqrt{(P_{ix} - P_{jx})^2 + (P_{iy} - P_{jy})^2 + e_i^2}.$$

$C(P_iP_j)$ = função da distância projetada sobre o plano x-y;

e_i = constante arbitrária não negativa que força que as distâncias menores que este limite arbitrário sejam positivas;

a_i = coeficientes da função que representa a superfície gerada;

$z(P_i)$ = Valores dos coeficientes *wavelets*.

Neste trabalho, são esperadas variações na distância muito pequenas. Vieira (2000) sugere para estes casos que se adote para e_i o valor de 0 (zero). Caso estas variações fossem muito grandes um valor sugerido seria $e_i = 0.815$ vezes a distância entre os pontos (VIEIRA, 2000 Apud HARDY, 1971).

Segundo Vieira (2000), o vetor a é obtido empregando o método dos mínimos quadrados, resolvendo a seguinte equação:

$$a = (D'.D)^{-1}D'.z \quad (45)$$

Se P é o ponto de interpolação com o plano (x,y) e existe uma solução para a Equação (45), então os valores interpolados para $F(x,y)$ é dado por (VIEIRA, 2000):

$$F(x, y) = a_1C(P - P_1) + a_2C(P - P_2) + a_3C(P - P_3) + a_4C(P - P_4) \quad (46)$$

Neste método de interpolação, a superfície gerada passa em todos os pontos de controle (VIEIRA, 2000).

Um exemplo da superfície gerada por um bloco 4x4 para a classe 2 é apresentado na Figura 40.

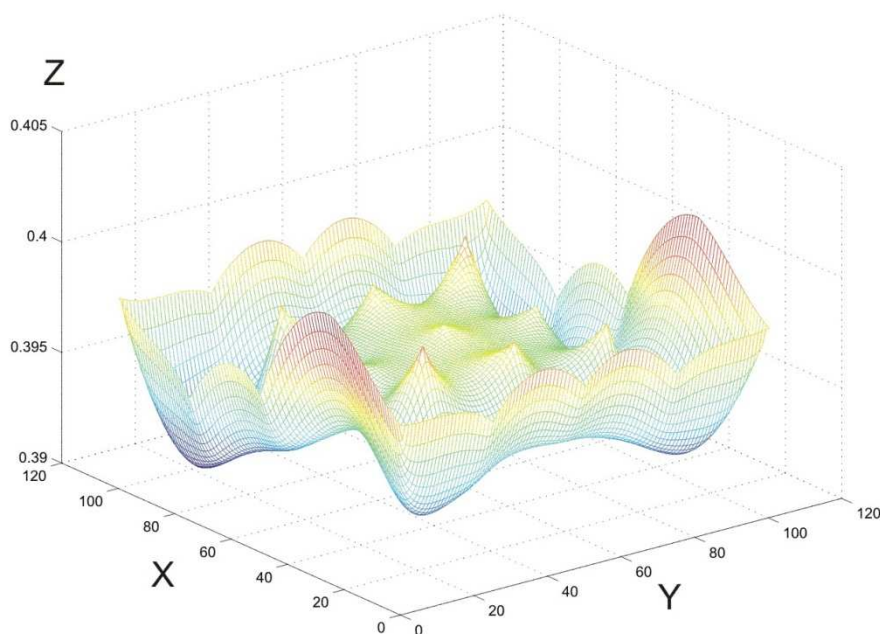


Figura 40. Superfície gerada pelo interpolador “*Collocation*”

Alguns dos resultados obtidos nesta etapa são apresentados no Apêndice 3.

3.1.8 Processo de redução das variáveis discriminatórias (coeficientes)

Quando o número de variáveis discriminantes utilizadas para a classificação é muito elevada, torna-se necessário a seleção do mínimo necessário de variáveis com o intuito de reduzir a quantidade necessária de amostras de treinamento no processo de classificação. Nessa dissertação foi utilizado o método “*Stepwise Forward*”.

Segundo Vieira (2000), o método “*Stepwise Forward*” é um dos métodos de seleção variável mais utilizados. Primeiramente, uma única variável que maximiza a acurácia da classificação é encontrada. O segundo passo é emparelhar à variável encontrada, uma segunda variável que continua maximizando a classificação, e assim

sucessivamente até que não se tenha mais um incremento estatisticamente significativo na acurácia da classificação, em relação ao uso de todas as variáveis discriminatórias. Em alguns experimentos neste trabalho conseguiu-se reduzir de 64 coeficientes para apenas três, mantendo-se ou até mesmo melhorando a acurácia na classificação, mostrando ser uma estratégia eficaz.

3.1.9 MaxVer

Segundo Fonseca (2000), o processo de classificação consiste na extração de informações em imagens para tornar possível reconhecer os padrões e objetos homogêneos com o objetivo de mapeamento e como resultado final tem-se uma imagem temática (mapa).

O método da máxima verossimilhança (Maxver) é um classificador supervisionado muito utilizado em sensoriamento remoto. O método utiliza parâmetros estatísticos (vetor média e matriz de covariância) onde pressupõe que os elementos de cada classe seguem uma distribuição normal multivariada, e avaliam-se as probabilidades que um dado elemento tem de pertencer a uma determinada classe e o designa àquela cuja probabilidade é maior (NISHIDA, 1998). A ponderação das distâncias entre médias dos níveis digitais das classes, utilizando parâmetros estatísticos também é levada em consideração. A distribuição de valores considerados para a classificação em uma área de treinamento é descrita por uma função do peso específico de probabilidade, desenvolvida com base na estatística Bayesana (INPE, 2002).

Nesta etapa, foram usados como vetores para a classificação os coeficientes polinomiais (variáveis discriminatórias) representantes das superfícies geradas pelo método “*collocation*” e reduzidas pelo método “*Stepwise Forward*”, para os blocos de dimensões 4x4 e 10x10, para os coeficientes horizontal, vertical e diagonal separadamente, ou seja, foram classificados os blocos ao contrário do realizado tradicionalmente em classificações de imagens orbitais, onde é classificado o pixel.

Na sua diagonal principal, a matriz de erros apresenta os blocos corretamente classificados. Nas suas colunas são apresentados os erros de omissão, que são os blocos omitidos de sua correta classe e atribuídos a outra classe. Nas suas linhas

estão os erros de comissão, que são os blocos incluídos erroneamente a uma classe que eles não pertencem.

A Exatidão Global ou Exatidão Total é obtida pelo somatório da diagonal principal da Matriz de Erros dividido pelo número total de blocos utilizados.

Segundo Vieira (2000), o índice kappa é uma medida para se avaliar o quão bem a classificação está de acordo com os dados de referência e é recomendada para medir a exatidão da classificação temática por se levar em consideração toda a matriz de erros, ao contrário da Exatidão Global que leva em consideração apenas a diagonal principal. A tabela 4 apresenta o desempenho da classificação em relação ao valor de Kappa obtido (FONSECA, 2000). Enquanto a Equação 47 mostra como o índice *kappa* pode ser obtido.

$$\hat{K} = \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r (X_{i+} X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (X_{i+} X_{+i})} \quad (47)$$

Onde:

\hat{K} = Índice de exatidão *kappa*;

r = Número de linhas da matriz;

X_{ii} = Número de observações dos elementos da diagonal da matriz;

$X_{i+} = \sum_j X_{ij}$ = Soma dos valores da linha i ;

$X_{+i} = \sum_j X_{ji}$ = Soma dos valores da coluna i ;

N = Número total de observações.

Também é apresentada a Equação 48 para o cálculo do *kappa* condicional, ou seja, ela fornece um índice para cada classe separadamente.

$$\hat{K}_{cond} = \frac{N \cdot X_{ii} - X_{i+} X_{+i}}{N \cdot X_{i+} - X_{i+} X_{+i}} \quad (48)$$

\hat{K}_{cond} = Índice kappa condicional;

N = Número total de observações;

X_{ii} = Número de observações dos elementos da diagonal da matriz;

$X_{i+} = \sum_j X_{ij}$ = Soma dos valores da linha i ;

$X_{+i} = \sum_j X_{ji}$ = Soma dos valores da coluna i .

Tabela 4. Índice do coeficiente Kappa e o correspondente conceito do desempenho da classificação.

Índice Kappa	Desempenho da classificação
< 0	Péssimo
$0 < \hat{K} \leq 0,2$	Mau
$0,2 < \hat{K} \leq 0,4$	Razoável
$0,4 < \hat{K} \leq 0,6$	Bom
$0,6 < \hat{K} \leq 0,8$	Muito Bom
$0,8 < \hat{K} \leq 1,0$	Excelente

Fonte: Fonseca (2000)

Este assunto é amplamente discutido por Fonseca (2000), Vieira (2000) e Mather (2004).

3.2 Estudo do peso específico da camada de revestimento

O objetivo desse estudo foi a aquisição dos valores dielétricos da camada de CBUQ no estado solto e compactado usando a técnica de reflexão e correlacionar o peso específico da camada do revestimento novo ao seu índice de vazios através da variação do valor dielétrico do revestimento no estado solto e posteriormente compactado usando um sistema GPR da MALA Geoscience com uma antena de contato Shielded HF 1,6 GHz.

3.2.1 Caracterização da área de estudo

A BR-040 é uma rodovia federal radial do Brasil e possui aproximadamente 1148 km. Seu ponto inicial fica na cidade de Brasília (DF), e o final, na cidade do Rio de Janeiro (RJ). Passa pelo Distrito Federal e pelos Estados de Goiás, Minas Gerais e Rio de Janeiro. Para aquisição dos dados, foi escolhido um trecho de duplicação da rodovia BR 040 situado na altura do km 470, estaca de projeto nº10381, no município de Sete Lagoas – MG, conforme ilustra a Figura 41. A ampliação da Figura 28 situada no canto inferior esquerdo, citada na subseção 3.1.1, caracteriza a região de estudo.



Figura 41. Aspecto do local de estudo: BR040, km 470, Pista Sul.

3.2.2 Instrumentação e aparelhagem utilizada

O equipamento utilizado para a determinação do peso específico da camada de revestimento foi um sistema RAMAC desenvolvido pela MALA *Geoscience*.



Figura 42. Sistema RAMAC desenvolvido pela MALA *Geoscience*.

A antena utilizada com o sistema RAMAC foi a *Shielded HF* 1,6 GHz com dimensões (160 x 90 x 110 mm) com 0.6 kg e ideal para pequenas profundidades. O “display” acoplado ao sistema é um “notebook” Toshiba (pentium I).



Figura 43. Antena *Shielded HF* da MALA com frequência central de 1,6 GHz.

Foi implementada a rotina “*importard3.m*” desenvolvida em Matlab para a visualização da imagem no formato “*rd3*”, formato utilizado pela MALA *Geoscience*. Este algoritmo lê a imagem no formato “*rd3*” e cria um arquivo no formato “*txt*” com os níveis de cinza da imagem original, para a posterior análise no software “*Excel*”). O algoritmo está disponível no Apêndice 5.

Configurações utilizadas na coleta dos dados:

- e) Tipo de amostra: 16 bits;
- f) Número de amostras por varredura: 312;
- g) Taxa de varredura: 50 disparos no mesmo local;
- h) Formato de arquivo: *.RD3 (MALA).

3.2.3 Trabalho de campo

Foi escolhido um trecho da BR 040 onde se estava realizando a aplicação de camada de CBUQ. Este tipo de serviço foi selecionado pelo fato de se poder ensaiar a camada solta⁸ e posteriormente a camada compactada⁹ de modo a assumir que as características físicas dos agregados permaneçam as mesmas, variando apenas o índice de vazios da mistura. Espera-se encontrar um valor dessa constante no estado solto maior que no estado compactado, pois será reduzido o índice de vazios no estado compactado.

Para a adaptação da técnica de reflexão, com o uso de antenas de contato, foi necessário desenvolver um suporte de madeira, de modo a deixar a antena suspensa do chão. Saarenketo (2006) sugere um valor de separação, entre a placa metálica e a antena de 30 a 50 cm, como também o uso de uma placa metálica com dimensões 1 x 1 metro com 2 mm de espessura tida como um refletor perfeito, conforme ilustra a Figura 44. Este valor de separação entre as antenas depende das características da antena e das dimensões da placa, com o objetivo de garantir que o sinal seja refletido somente pela placa metálica. Neste trabalho utilizou-se uma elevação de 39 cm.

⁸ Esta camada recebeu apenas a vibração da mesa acabadora, sem a utilização de rolos compactadores.

⁹ Camada resultante após a utilização de rolos compactadores.



Figura 44. Sistema de GPR com suporte para a antena.

Neste ensaio foram realizadas leituras em dois pontos distintos, um no bordo esquerdo e outro no bordo direito do local escolhido no sentido Brasília - Belo Horizonte. Para cada ponto foram realizadas quatro leituras com o GPR divididas em 4 passos: o primeiro passo foi realizar leituras sobre o CBUQ solto e sem a placa metálica, o segundo passo foi realizar leituras sobre o CBUQ solto e com a placa metálica, no terceiro passo foram obtidas leituras com o CBUQ compactado e sem a placa metálica, e por fim foram realizadas leituras com o CBUQ compactado e com a placa metálica. A Figura 45 apresenta o procedimento descrito acima.

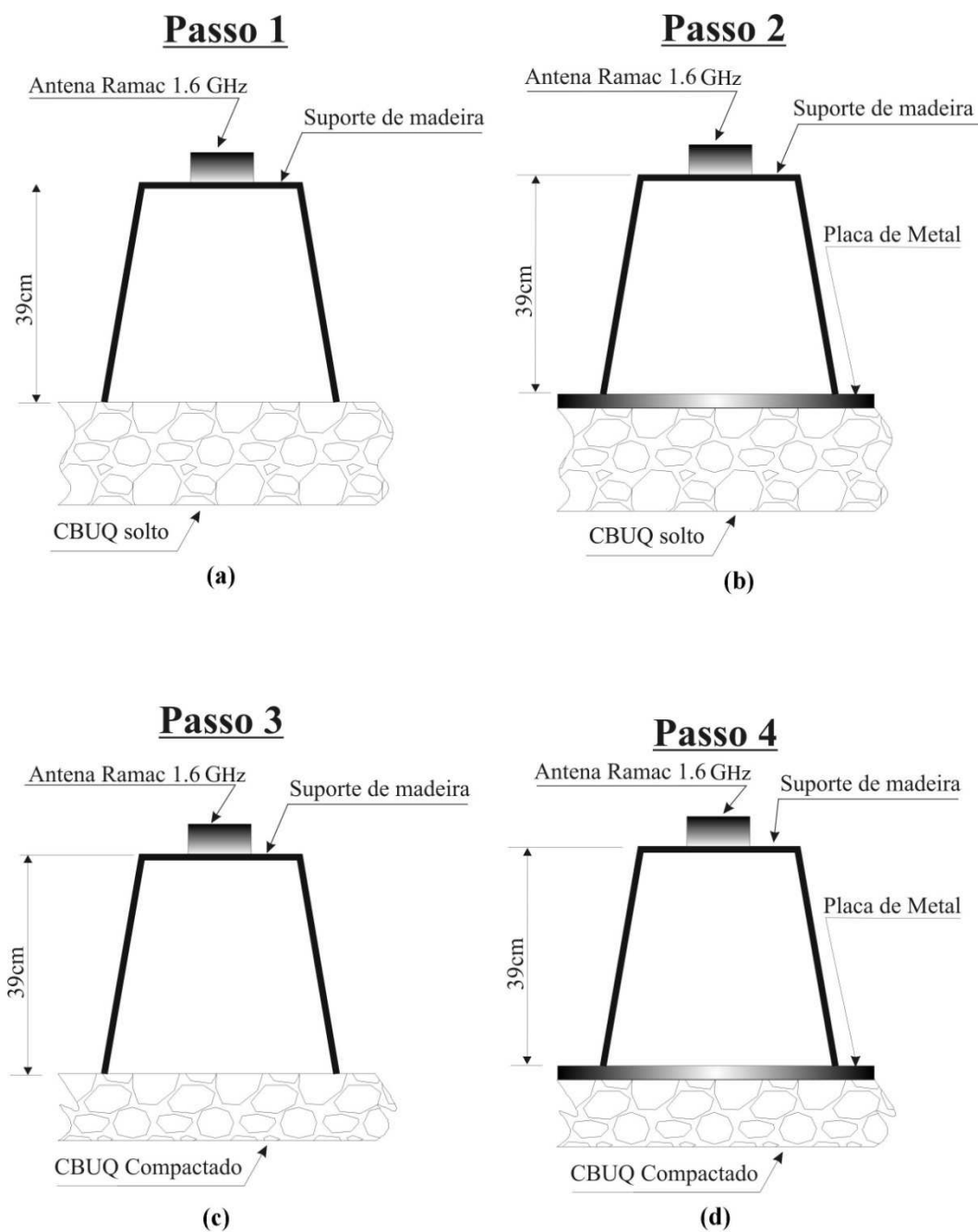


Figura 45. Passos para a obtenção dos resultados usando a técnica da reflexão.

3.2.4 Processamento e análise dos dados

Devido a dificuldade de interpretar as amplitudes diretamente no software por causa da imprecisão ao mover o *mouse* sobre o “radargrama”, foi desenvolvido o algoritmo “*importard3.m*”, que importa a imagem em seu formato original (*.RD3) e grava os dados em formato de “texto” tornando possível exportá-los para o Excel

onde calculou-se a posição de maior amplitude através da média aritmética de todos os traços obtidos.

Após a remoção do off-set, para se determinar a posição correta das amplitudes a se adotar para os cálculos foi utilizada a Equação 1, exemplificada pela Equação 47, onde obtêm-se o tempo que a onda aérea levará para percorrer da antena até o chão. A Figura 46 apresenta o “radargrama” obtido durante a aquisição de dados com o CBUQ solto e com a placa metálica, também mostra a amplitude adotada para os cálculos utilizando a Equação 47. Não foi utilizada a remoção do *background* porque degradavam os dados.

$$s = \frac{vt}{2} \therefore t = 2 \frac{s}{v} \therefore t = 2 \times \frac{0,39}{0,3} \therefore t = 2,6 \text{ ns} \quad (47)$$

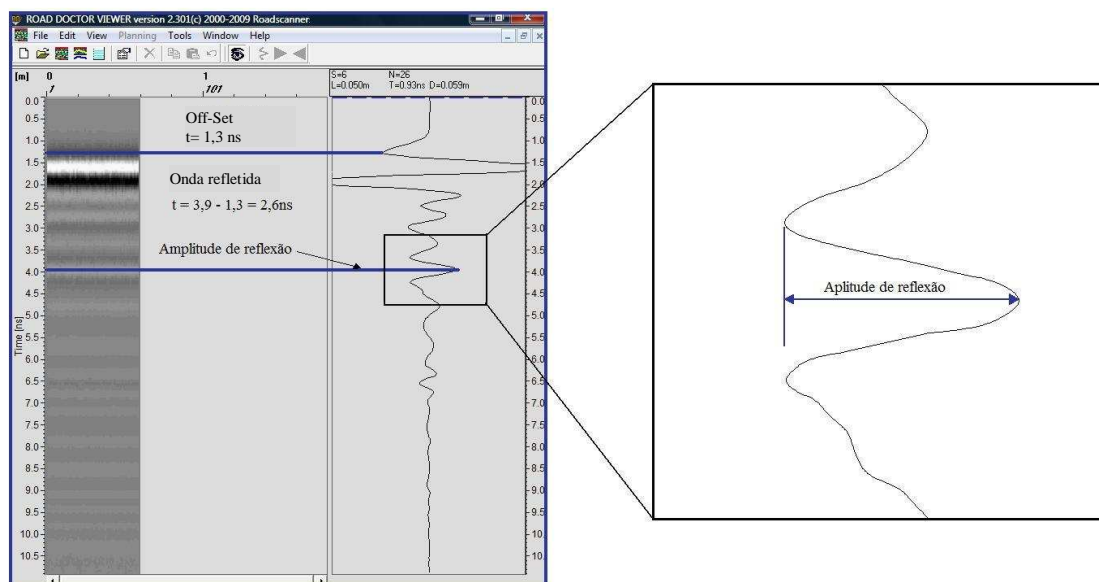


Figura 46. Aspecto do traço obtido com o CBUQ solto e com a placa metálica. Ambas as escalas verticais estão nanosegundos.

Após a identificação da amplitude (Equação 47) a ser usada nos cálculos, foi utilizado o software Excel para retornar o valor da maior média aritmética de todos os traços da região que representam o pico da amplitude de reflexão e usá-la para o cálculo da constante dielétrica por meio da Equação 35.

4. RESULTADOS E DISCUSÕES

Os resultados obtidos nesse estudo estão relacionados com a identificação automática das camadas que constituem o pavimento e a determinação do peso específico da camada de revestimento, e são descritos nas subseções 4.1 e 4.2 respectivamente.

4.1 Identificação automática das camadas que compõem o pavimento.

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos com a classificação dos “radargramas”. Para tal discussão se levou em consideração a matriz de erros gerada e os parâmetros estatísticos obtidos a partir dela como: Exatidão Global, índice kappa, erros de omissão e erros de comissão.

Nesta etapa, foi realizado para cada “radargrama” (imagem de referência), tanto para o obtido a 30 cm quanto para o obtido a 1 metro da borda da reconstrução (Figuras 33 e 34 respectivamente, subseção 3.1.3), seis tipos de classificações dispostas da seguinte maneira: cada imagem foi classificada usando os blocos 4x4 e 10x10 *pixels*, que contêm variáveis discriminatórias representantes das superfícies geradas pelo método *collocation* e reduzidas pelo método “*Stepwise Forward*”, para os coeficientes horizontal, vertical e diagonal, separadamente, resultando em seis imagens temáticas para cada “radargrama”.

Os resultados da classificação utilizando o classificador MaxVer para o “radargrama” apresentado pela Figura 33 para os blocos 4x4 e 10x10 *pixels*, são apresentados na Tabelas 5 e 7, respectivamente. Enquanto os resultados para a Figura 34 (obtida a 1 metro da borda da reconstrução) para os blocos 4x4 e 10x10 *pixels* são apresentados pelas Tabelas 6 e 8 respectivamente.

Tabela 5. Matriz de Erros para os coeficientes diagonal, horizontal e vertical da imagem obtida a 30 cm da borda da reconstrução, usando bloco 4x4 pixels.

IMAGEM	COEF.	MATRIZ DE ERROS						PARÂMETROS		
		Classe	1	2	3	4	Total	E.C.(%)		
“radargrama” (Figura 33) Bloco (4x4 pixels)	Diagonal (Figura 47)	1	41	6	0	3	50	18	Kappa = 0,393	$\hat{R}cond_{(Off-Set)} = 0,76$
		2	0	7	0	1	8	12,5	Var. Kappa = 0,001680	$\hat{R}cond_{(Revestimento)} = 0,10$
		3	6	30	47	32	115	59,1	Z estatístico = 9,597	$\hat{R}cond_{(Macadame)} = 0,86$
		4	3	7	3	14	27	48,1	EG = 54,5%	$\hat{R}cond_{(Subleito)} = 0,17$
		Total	50	50	50	50	200			
		E.O.(%)	18,0	86,0	6,0	72,0				
	Horizontal (Figura 48)	Classe	1	2	3	4	Total	E.C.(%)		
		1	6	0	0	0	6	0	Kappa = 0,220	$\hat{R}cond_{(Off-Set)} = 0,09$
		2	39	22	1	6	68	67,6	Var. Kappa = 0,001322	$\hat{R}cond_{(Revestimento)} = 0,15$
		3	5	28	49	38	120	59,2	Z estatístico = 6,050	$\hat{R}cond_{(Macadame)} = 0,95$
		4	0	0	0	6	6	0	EG = 41,5%	$\hat{R}cond_{(Subleito)} = 0,09$
		Total	50	50	50	50	200			
		E.O.(%)	88,0	56,0	2,0	88,0				
	Vertical (Figura 49)	Classe	1	2	3	4	Total	E.C.(%)		
		1	43	7	1	4	55	21,8	Kappa = 0,440	$\hat{R}cond_{(Off-Set)} = 0,81$
		2	3	19	5	15	42	54,8	Var. Kappa = 0,002083	$\hat{R}cond_{(Revestimento)} = 0,22$
		3	1	10	37	14	62	40,3	Z estatístico = 9,641	$\hat{R}cond_{(Macadame)} = 0,62$
4		3	14	7	17	41	58,5	EG = 58,0%	$\hat{R}cond_{(Subleito)} = 0,17$	
Total		50	50	50	50	200				
E.O.(%)		14,0	62,0	26,0	66,0					
E.O. = Erro de Omissão / E.C. = Erro de Comissão / E.G. = Exatidão Global / $\hat{R}cond$ = Kappa Condicional										

Tabela 6. Matriz confusão para os coeficientes diagonal, horizontal e vertical da imagem obtida a 1 metro da borda da reconstrução, usando bloco 4x4 pixels.

IMAGEM	COEF.	MATRIZ DE ERROS							PARÂMETROS		
		Classe	1	2	3	4	Total	E.C.(%)			
“radargrama” (Figura 34) Bloco (4x4 pixels)	Diagonal (Figura 50)	1	39	5	2	6	52	25,0	Kappa = 0,420	$\hat{K}cond_{(Off-Set)} = 0,70$	
		2	5	14	0	3	22	36,4	Var. Kappa = 0,001882	$\hat{K}cond_{(Revestimento)} = 0,19$	
		3	3	20	45	26	94	52,1	Z estatístico = 9,682	$\hat{K}cond_{(Macadame)} = 0,81$	
		4	3	11	3	15	32	53,1	EG = 56,5%	$\hat{K}cond_{(Subleito)} = 0,17$	
		Total	50	50	50	50	200				
		E.O.(%)	22,0	72,0	10,0	70,0					
		Horizontal (Figura 51)	1	48	2	5	11	66	27,3	Kappa = 0,620	$\hat{K}cond_{(Off-Set)} = 0,94$
	2		0	42	2	4	48	12,5	Var. Kappa = 0,001595	$\hat{K}cond_{(Revestimento)} = 0,79$	
	3		2	6	43	25	76	43,4	Z estatístico = 15,525	$\hat{K}cond_{(Macadame)} = 0,77$	
	4		0	0	0	10	10	0,0	EG = 71,5%	$\hat{K}cond_{(Subleito)} = 0,16$	
	Total		50	50	50	50	200				
	E.O.(%)		4,0	16,0	14,0	80,0					
	Vertical (Figura 52)		1	39	2	0	2	43	9,3	Kappa = 0,407	$\hat{K}cond_{(Off-Set)} = 0,72$
		2	4	12	0	2	18	33,3	Var. Kappa = 0,002037	$\hat{K}cond_{(Revestimento)} = 0,16$	
		3	4	20	38	24	86	55,8	Z estatístico = 9,011	$\hat{K}cond_{(Macadame)} = 0,58$	
		4	3	16	12	22	53	58,5	EG = 55,5%	$\hat{K}cond_{(Subleito)} = 0,24$	
		Total	50	50	50	50	200				
		E.O.(%)	22,0	76,0	24,0	56,0					
		E.O. = Erro de Omissão / E.C. = Erro de Comissão / EG = Exatidão Global / $\hat{K}cond$ = Kappa Condicional									

Tabela 7. Matriz confusão obtida para os coeficientes diagonal, horizontal e vertical da imagem obtida a 30 cm da borda da reconstrução, usando bloco 10x10 pixels.

IMAGEM	COEF.	MATRIZ DE ERROS							PARÂMETROS		
		Classe	1	2	3	4	Total	E.C.(%)			
“radargrama” (Figura 33) Bloco (10x10 pixels)	Diagonal (Figura 53)	1	37	0	0	0	37	0,0	Kappa = 0,407	$\widehat{K}cond_{(Off-Set)} = 0,68$	
		2	2	12	0	3	17	29,4	Var. Kappa = 0,001843	$\widehat{K}cond_{(Revestimento)} = 0,17$	
		3	10	33	45	30	118	61,9	Z estatístico = 9,473	$\widehat{K}cond_{(Macadame)} = 0,76$	
		4	1	5	5	17	28	39,3	EG = 55,5%	$\widehat{K}cond_{(Subleito)} = 0,23$	
		Total	50	50	50	50	200				
		E.O.(%)	26,0	76,0	10,0	66,0					
		Horizontal (Figura 54)	1	10	0	0	0	10	0,0	Kappa = 0,333	$\widehat{K}cond_{(Off-Set)} = 0,16$
	2		1	26	3	7	37	29,7	Var. Kappa = 0,001874	$\widehat{K}cond_{(Revestimento)} = 0,41$	
	3		2	23	46	25	96	52,1	Z estatístico = 7,701	$\widehat{K}cond_{(Macadame)} = 0,85$	
	4		37	1	1	18	57	68,4	EG = 50,0%	$\widehat{K}cond_{(Subleito)} = 0,10$	
	Total		50	50	50	50	200				
	E.O.(%)		80,0	48,0	8,0	64,0					
		Vertical (Figura 55)	1	39	0	0	0	39	0,0	Kappa = 0,493	$\widehat{K}cond_{(Off-Set)} = 0,73$
	2		8	25	1	4	38	34,2	Var. Kappa = 0,001921	$\widehat{K}cond_{(Revestimento)} = 0,38$	
	3		3	15	45	31	94	52,1	Z estatístico = 11,255	$\widehat{K}cond_{(Macadame)} = 0,81$	
	4		0	10	4	15	29	48,3	EG = 62,0%	$\widehat{K}cond_{(Subleito)} = 0,18$	
	Total		50	50	50	50	200				
	E.O.(%)		22,0	50,0	10,0	70,0					
E.O. = Erro de Omissão / E.C. = Erro de Comissão / EG = Exatidão Global / $\widehat{K}cond$ = Kappa Condicional											

Tabela 8. Matriz confusão obtida para os coeficientes diagonal, horizontal e vertical da imagem obtida a 1 metro da borda da reconstrução, usando bloco 10x10 pixels.

IMAGEM	COEF.	MATRIZ DE ERROS						PARÂMETROS		
		Classe	1	2	3	4	Total	E.C.(%)		
“radargrama” (Figura 34) Bloco (10x10 pixels)	Diagonal (Figura 56)	1	41	4	2	6	53	22,6	Kappa = 0,373	$\hat{K}cond_{(Off-Set)} = 0,76$
		2	3	15	10	8	36	58,3	Var. Kappa = 0,002126	$\hat{K}cond_{(Revestimento)} = 0,15$
		3	4	19	31	17	71	56,3	Z estatístico = 8,096	$\hat{K}cond_{(Macadame)} = 0,41$
		4	2	12	7	19	40	52,5	EG = 53,0%	$\hat{K}cond_{(Subleito)} = 0,23$
		Total	50	50	50	50	200			
		E.O.(%)	18,0	70,0	38,0	62,0				
		Horizontal (Figura 57)	Classe	1	2	3	4	Total	E.C.(%)	
	1	12	0	0	0	12	0,0	Kappa = 0,313	$\hat{K}cond_{(Off-Set)} = 0,19$	
	2	3	31	2	9	45	31,1	Var. Kappa = 0,001605	$\hat{K}cond_{(Revestimento)} = 0,51$	
	3	34	19	46	33	132	65,2	Z estatístico = 7,821	$\hat{K}cond_{(Macadame)} = 0,76$	
	4	1	0	2	8	11	27,3	EG = 48,5%	$\hat{K}cond_{(Subleito)} = 0,11$	
	Total	50	50	50	50	200				
	E.O.(%)	76,0	38,0	8,0	84,0					
	Vertical (Figura 58)	Classe	1	2	3	4	Total	E.C.(%)		
	1	35	3	0	0	38	7,9	Kappa = 0,380	$\hat{K}cond_{(Off-Set)} = 0,63$	
	2	8	25	6	14	53	52,8	Var. Kappa = 0,001852	$\hat{K}cond_{(Revestimento)} = 0,32$	
	3	5	20	43	32	100	57,0	Z estatístico = 8,831	$\hat{K}cond_{(Macadame)} = 0,72$	
	4	2	2	1	4	9	55,6	EG = 53,5%	$\hat{K}cond_{(Subleito)} = 0,04$	
Total	50	50	50	50	200					
E.O.(%)	30,0	50,0	14,0	92,0						
E.O. = Erro de Omissão / E.C. = Erro de Comissão / EG = Exatidão Global / $\hat{K}cond$ = Kappa Condicional										

O melhor resultado encontrado para a exatidão global (EG) foi de 71,5% (Tabela 6), correspondente a Figura 51, e o pior 41,5% (Tabela 5), correspondente a Figura 48. O melhor índice, de exatidão kappa, foi de 0,62 (Tabela 6) enquanto o pior foi 0,22 (Tabela 5). Os melhores resultados para o índice kappa condicional, para cada classe separadamente, são: (0,95) para o coeficiente horizontal, classe 3 (Tabela 5); (0,94) para o coeficiente horizontal, classe 1 (Tabela 6); (0,79) para o coeficiente horizontal, classe 2 (Tabela 6); (0,24) para o coeficiente vertical, classe 4 (Tabela 6). Em uma análise mais abrangente, para cada classe, e para os diferentes coeficientes utilizados, para os blocos 4x4 e 10x10 simultaneamente, obteve-se como média para o kappa condicional: Classe 1 (D = 0,72; V = 0,72; H = 0,35), vale ressaltar que para o coeficiente horizontal, os índices alcançados para o melhor (0,94) e o pior (0,09) valor, tiveram uma variância elevada; Classe 2 (D = 0,15; V = 0,27; H = 0,47); Classe 3 (D = 0,71; V = 0,68; H = 0,83), Classe 4 (D = 0,20; V = 0,16; H = 0,12). Com base nestes resultados, concluí-se que as classes que obtiveram os melhores resultados, em ordem decrescente, foram: 3 (macadame), 1 (off-set), 2 (revestimento) e por fim a classe 4 (subleito).

Levando em consideração a soma dos erros de omissão e comissão, o coeficiente que melhor discriminou a classe 1 (off-set), foi o coeficiente vertical. Para a classe 2 (revestimento) foi o coeficiente horizontal, mas com muitos blocos classificados erroneamente. Para a classe 3 (macadame), o coeficiente horizontal obteve melhor êxito. Já a classe 4 (subleito) foi a classe com maior dificuldade na classificação, tendo muitos pixels atribuídos erradamente às outras classes, para os 3 coeficientes utilizados; no entanto, o melhor resultado para esta classe, foi obtido com o coeficiente horizontal, contrariando o apontado pelo índice kappa condicional, que foi o coeficiente diagonal.

De uma maneira geral, para as 12 imagens analisadas, levando-se em consideração o kappa condicional, a classe melhor discriminada pelo classificador foi a classe 3 (macadame) seguida da classe 1 (off-set), onde os resultados obtidos foram promissores. As demais classes apresentaram muitos blocos classificados erroneamente. Apesar da classe 4 ter atribuído erroneamente blocos às classes 2 e 3, o que piorou o resultado, a imagem temática obtida se mostrou satisfatória. De acordo com a Tabela 4, todas as imagens tiveram um desempenho na classificação de

razoável a bom, levando em consideração o índice de exatidão kappa. Já com relação ao índice kappa condicional, a classe 1 obteve uma classificação considerada como “muito boa” para os coeficientes “diagonal e vertical”; a classe 2 como “boa” com o coeficiente “horizontal”; a classe 3 como “excelente” para o coeficiente “horizontal”; e a classe 4 como “péssimo” para os três coeficientes analisados.

O extrator 4x4 *pixels*, de maneira geral, apresentou melhores resultados que o extrator 10x10 *pixels*, o que contraria o esperado. O esperado era que os blocos 10x10 *pixels* representassem melhor a superfície, uma vez que uma superfície espacial maior, poderia extrair a textura melhor da imagem e conseqüentemente fornecesse coeficientes que discriminasse melhor essas feições trazendo assim maior eficiência ao classificador utilizado (MaxVer).

Com relação às espessuras obtidas através das imagens classificadas, a classe “*Off-Set*” indicou muito bem a posição da superfície do revestimento; a espessura obtida para a camada de revestimento oscilou em torno dos 17 cm de profundidade; a de macadame ficou entre 17 e 49 cm aproximadamente; enquanto o subleito assumiu profundidade, a partir de 49 cm.

As Figuras 47, 48 e 49 apresentam as imagens temáticas obtidas para o bloco 4x4 para o “radargrama” extraído a 30 cm da borda da reconstrução (Figura 33) para as componentes diagonal, horizontal e vertical respectivamente.

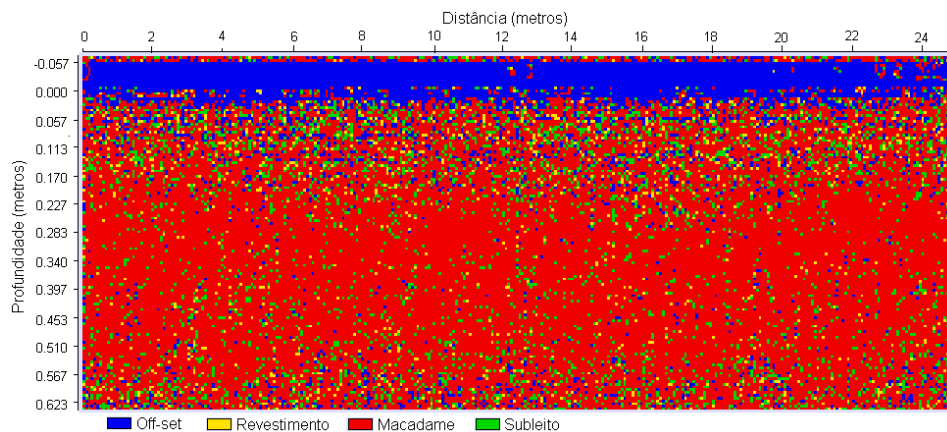


Figura 47. Imagem temática para os coeficientes diagonal da imagem obtida a 30 cm da borda da reconstrução, bloco 4x4.

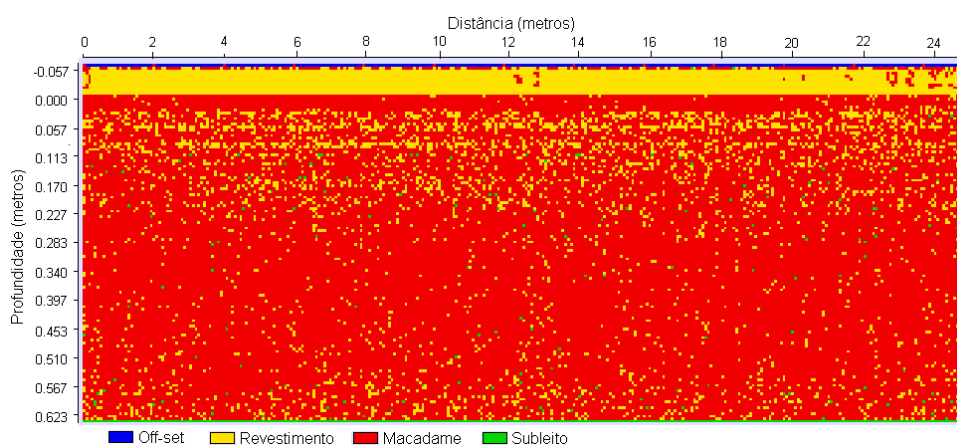


Figura 48. Imagem temática para os coeficientes horizontal da imagem obtida a 30 cm da borda da reconstrução, bloco 4x4.

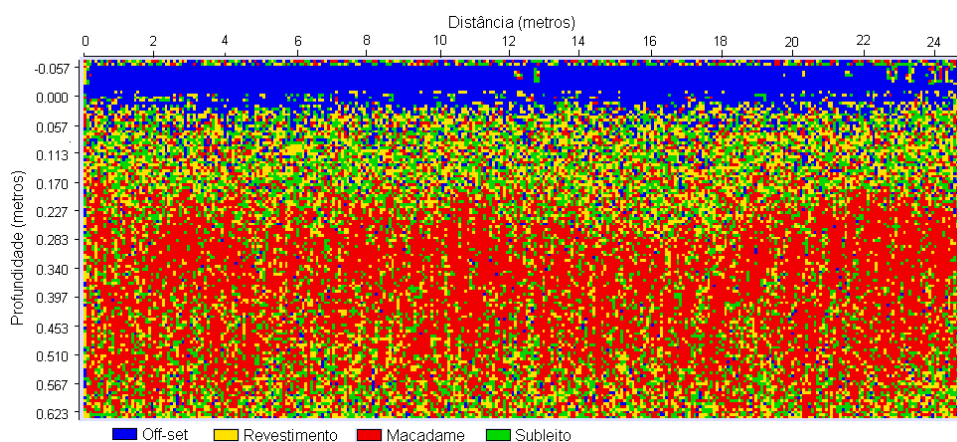


Figura 49. Imagem temática para os coeficientes vertical da imagem obtida a 30 cm da borda da reconstrução, bloco 4x4.

As Figuras 50, 51 e 52 apresentam as imagens temáticas obtidas para o bloco 4x4 para o “radargrama” extraído a 1 metro da borda da reconstrução (Figura 34) para as componentes diagonal, horizontal e vertical respectivamente.

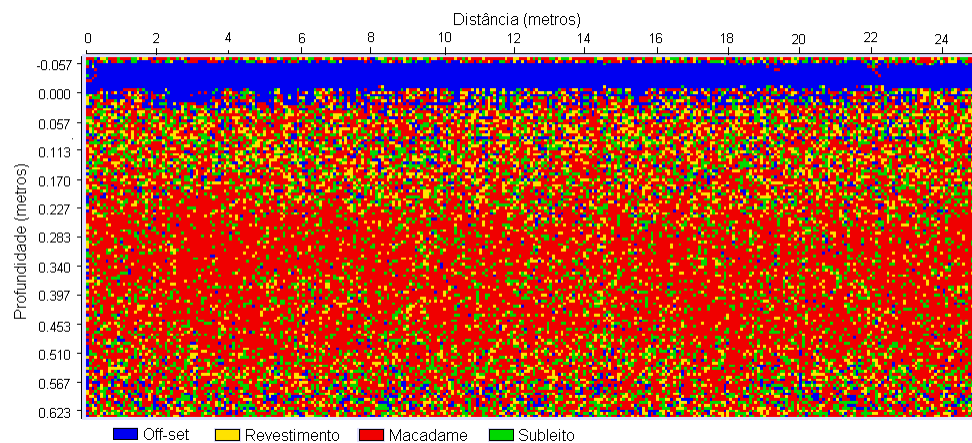


Figura 50. Imagem temática para os coeficientes diagonal da imagem obtida a 1 metro da borda da reconstrução, bloco 4x4.

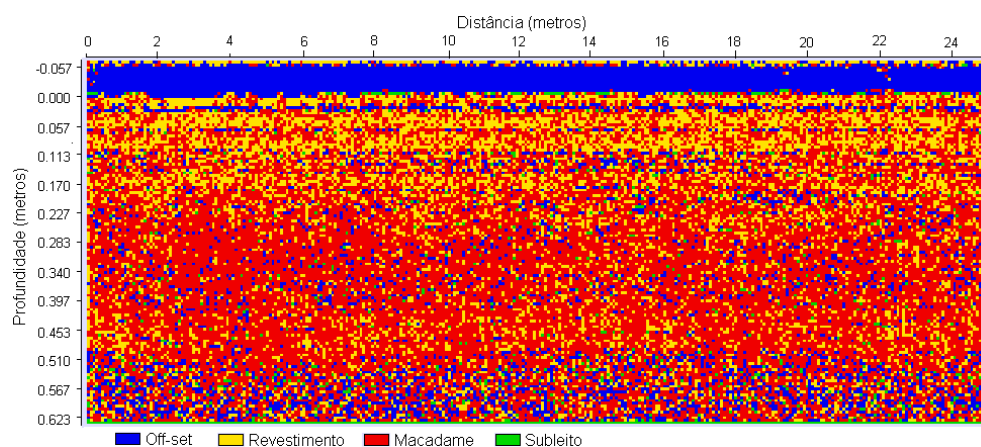


Figura 51. Imagem temática para os coeficientes horizontal da imagem obtida a 1 metro da borda da reconstrução, bloco 4x4.

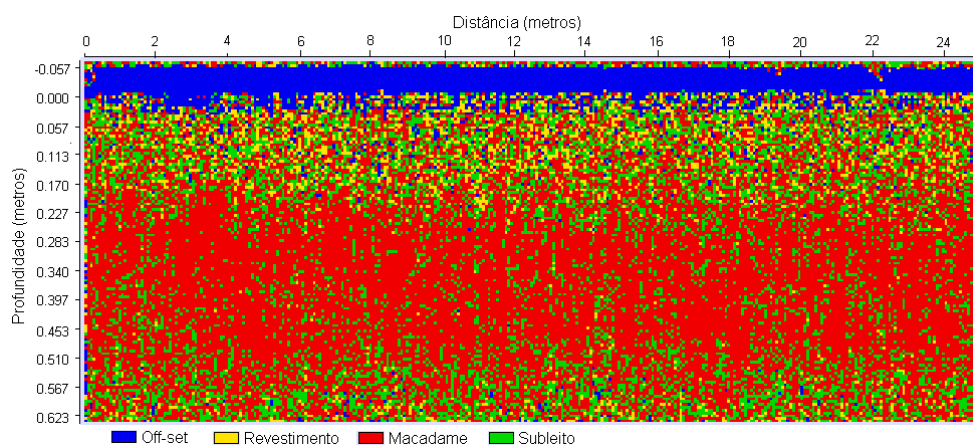


Figura 52. Imagem temática obtida para os coeficientes vertical da imagem obtida a 1 metro da borda da reconstrução, bloco 4x4.

Os resultados para o bloco 10x10 aplicado na imagem obtida pelo GPR a 30 cm da borda da reconstrução (Figura 33) são apresentados nas Figuras 53, 54 e 55 para as componentes diagonal, horizontal e vertical respectivamente.

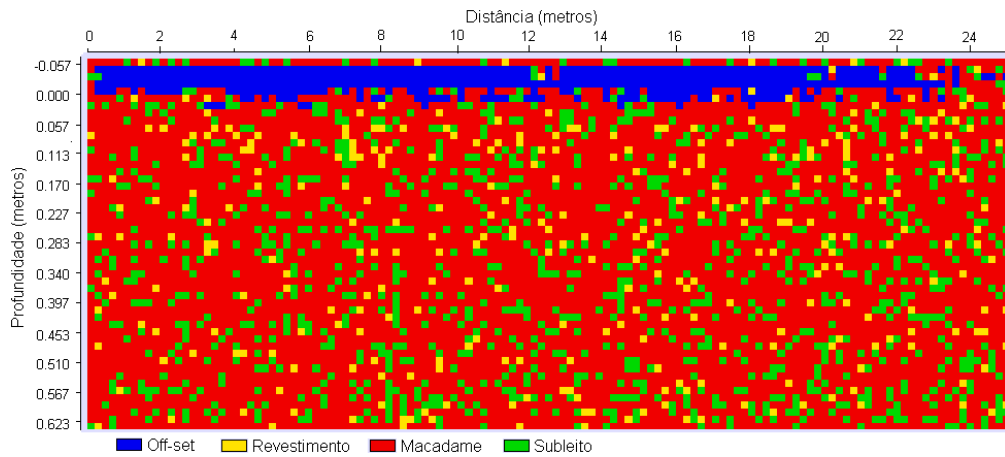


Figura 53. Imagem temática obtida para os coeficientes diagonal da imagem obtida a 30 cm da borda da reconstrução, bloco 10x10.

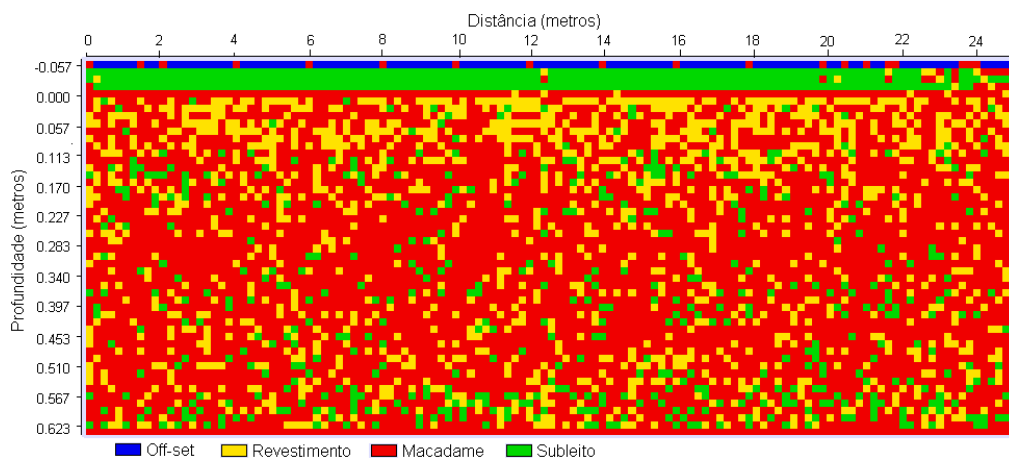


Figura 54. Imagem temática obtida para os coeficientes horizontal da imagem obtida a 30 cm da borda da reconstrução, bloco 10x10.

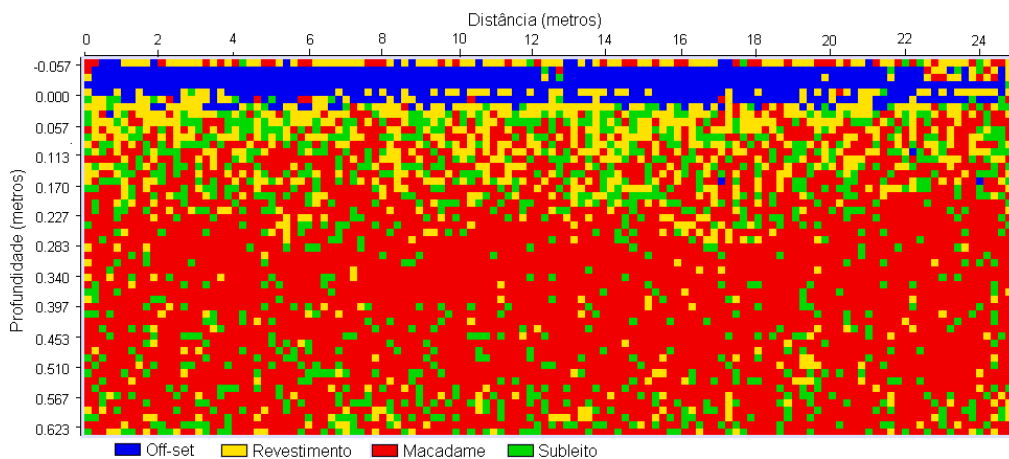


Figura 55. Imagem temática obtida para os coeficientes Vertical da imagem obtida a 30 cm da borda da reconstrução, bloco 10x10.

Já os resultados obtidos para o bloco 10x10, aplicado na imagem obtida pelo GPR a 1 metro da borda da reconstrução (Figura 34), são apresentados nas Figuras 56, 57 e 58, para as componentes diagonal, horizontal e vertical respectivamente.

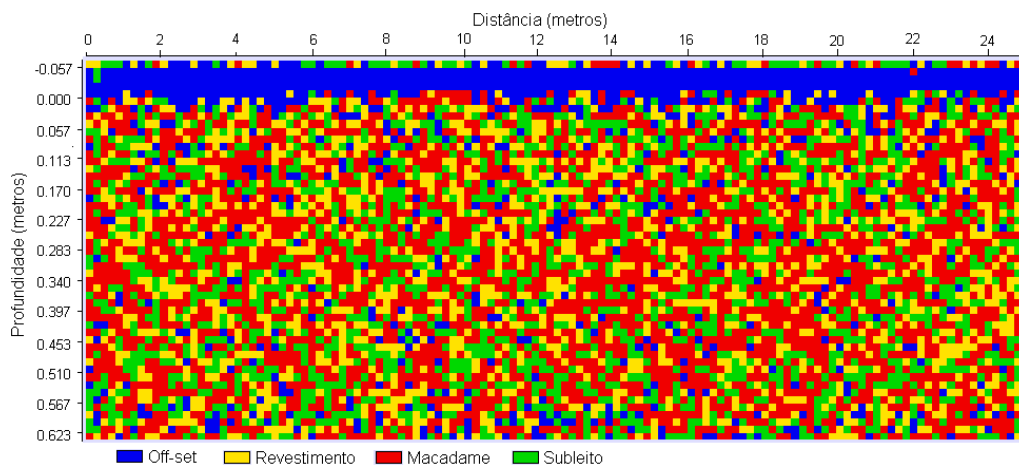


Figura 56. Imagem temática obtida para os coeficientes diagonal da imagem obtida a 1 metro da borda da reconstrução, bloco 10x10.

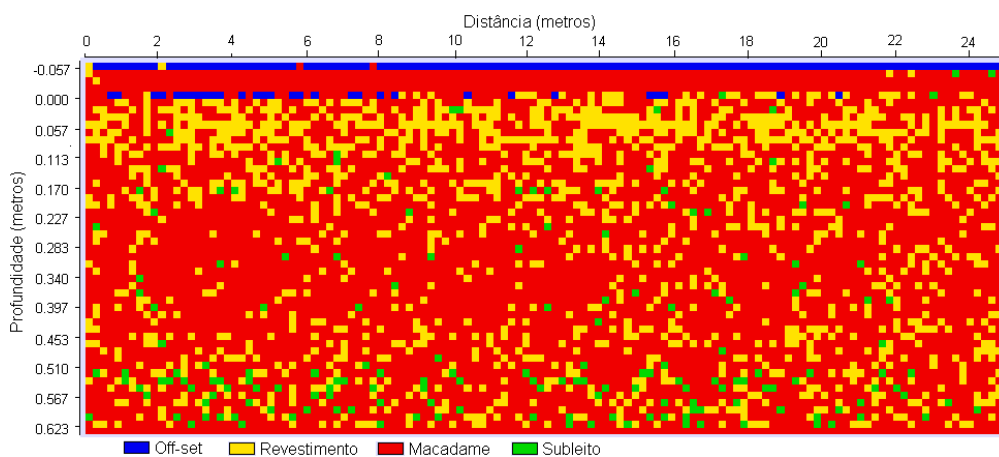


Figura 57. Imagem temática obtida para os coeficientes horizontal da imagem obtida a 1 metro da borda da reconstrução, bloco 10x10.

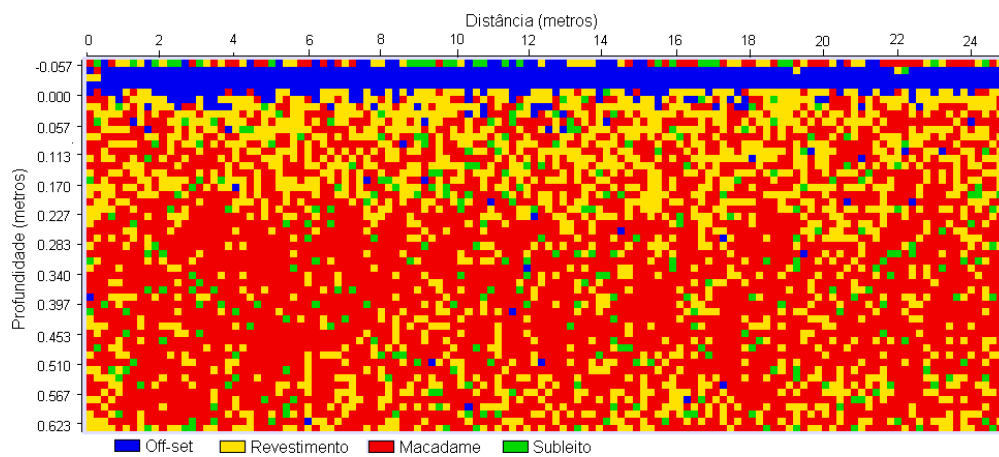


Figura 58. Imagem temática obtida para os coeficientes vertical da imagem obtida a 1 metro da borda da reconstrução, bloco 10x10.

4.2 Determinação do peso específico da camada de revestimento

As Tabelas 9 e 10 apresentam os resultados dos cálculos obtidos a partir da Equação (35), para os bordos esquerdo e direito da rodovia, respectivamente. Foi possível apenas a obtenção de quatro valores para a constante dielétrica para validar o modelo matemático devido às dificuldades de campo.

Tabela 9. Valores dielétricos para o bordo esquerdo do local de estudo.

<i>Bordo Esquerdo</i>					
Etapa	Amplitude (+)	Amplitude (-)	Soma Amplitude	Solto ¹⁰ / Compactado	Valor dielétrico
1	3290	2012	5302	CBUQ Solto	25,8
2	4030	3872	7902		
3	1351	2389	3740	CBUQ Comp.	7,6
4	3231	4668	7899		

Tabela 10. Valores dielétricos para o bordo direito do local de estudo.

<i>Bordo Direito</i>					
Etapa	Amplitude (+)	Amplitude (-)	Soma Amplitude	Solto ¹⁰ / Compactado	Valor dielétrico
1	2582	887	3469	CBUQ Solto	6,7
2	4139	3692	7831		
3	2758	1146	3904	CBUQ Comp.	7,9
4	4207	3995	8202		

¹⁰ Representa o material sem aplicação da energia de compactação (rolagem), apenas submetido a vibração da mesa da acabadora.

Observa-se que o valor obtido para o bordo esquerdo com o CBUQ no estado solto ficou fora do esperado (valor dielétrico igual a 25,8). O valor aguardado para as misturas asfálticas é um valor dielétrico entre 4 e 8, e caso haja escória na mistura este valor pode chegar até 15 (SAARENKETO, 2006). Por esse motivo este valor foi descartado para a validação da equação. Este erro pode ter ocorrido por alguma interferência no momento da aquisição de dados como rádios, celulares ou até mesmo algum objeto desconhecido.

Entretanto, os outros valores encontrados se mostraram coerentes. Esperava-se um valor dielétrico para o CBUQ no estado solto menor do que no estado compactado por causa do maior índice de vazios, o que não se confirmou (Tabelas 9 e 10). Além disso, o valor obtido para o CBUQ no estado compactado no bordo esquerdo se mostrou semelhante ao obtido no bordo direito, e isso era esperado já que esses dois pontos receberam uma energia de compactação semelhante.

Os resultados dos ensaios de laboratório para os dois pontos amostrados estão resumidos na Tabela 11 abaixo.

Tabela 11. Dados de laboratório para os pontos ensaiados.

<i>Elementos de Análise</i>		<i>Bordo</i>	
		Direito	Esquerdo
Espessura (cm)	Solta	9	10
	Compactada	7,4	8,1
Peso Específico (kg/m ³)	Solta	1973	1935
	Compactada	2399	2360

De posse dos dados dos pesos específicos e da constante dielétrica da camada de revestimento torna-se possível uma correlação linear entre os dados. A Figura 59 apresenta o aspecto da reta que faz a correlação dos pontos obtidos.

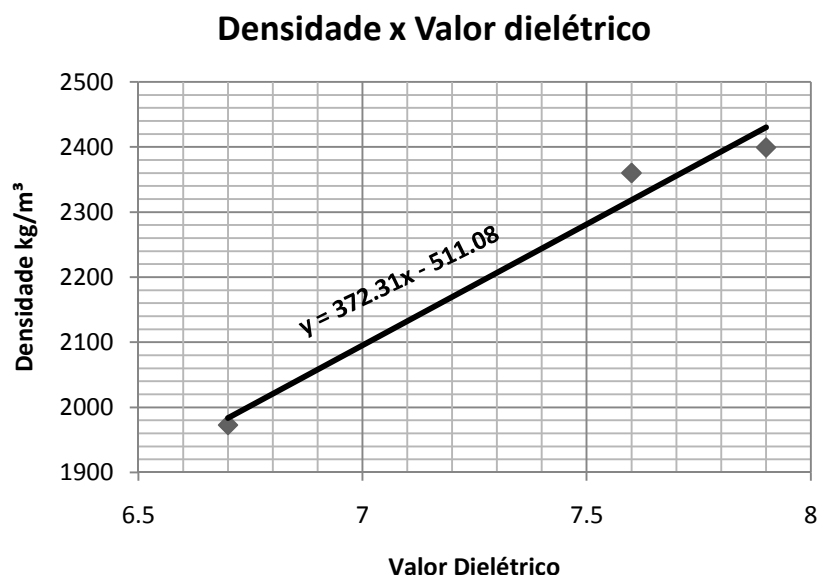


Figura 59. Correlação entre o peso específico e o valor dielétrico.

Nota-se que pela Figura 59 e pelo emprego da equação da reta que correlaciona o peso específico em (kg/m^3) com o valor dielétrico da mistura, que o valor dielétrico esperado para o CBUQ no estado solto, no bordo esquerdo onde o peso específico medida em laboratório foi 1935 kg/m^3 , é algo em torno de 6,6 e não o valor obtido nesta metodologia (Tabela 9).

As Figuras 60 e 61 apresentam os “radargramas” obtidos no bordo esquerdo e direito respectivamente, no sentido Brasília – Belo Horizonte. Nota-se que existe uma alteração visível na amplitude relacionada próximo ao tempo de 4 ns, entre as leituras sem e com a placa metálica, confirmando os cálculos realizados com a Equação 1. As amplitudes com a placa metálica apresentam-se maiores do que sem a placa metálica, mostrando ser um melhor refletor que o piso asfáltico.

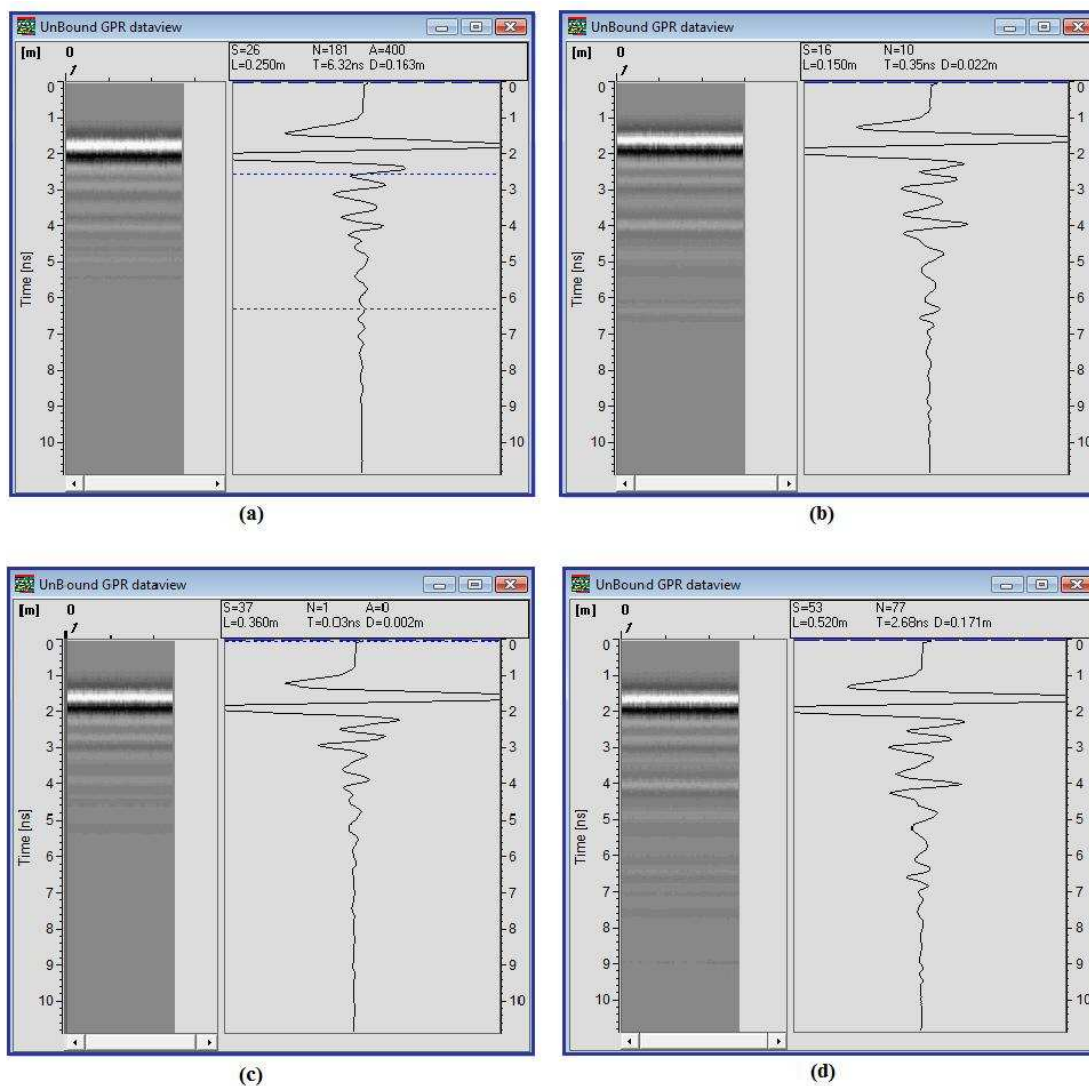


Figura 60. “Radargramas” obtidos no bordo esquerdo sentido Brasília – BH. (a) “radargrama” obtido para o CBUQ no estado solto e sem a placa metálica. (b) “radargrama” obtido para o CBUQ no estado solto e com a placa metálica. (c) “radargrama” obtido com o CBUQ no estado compactado e sem a placa metálica. (d) “radargrama” obtido com o CBUQ no estado compactado e com a placa metálica.

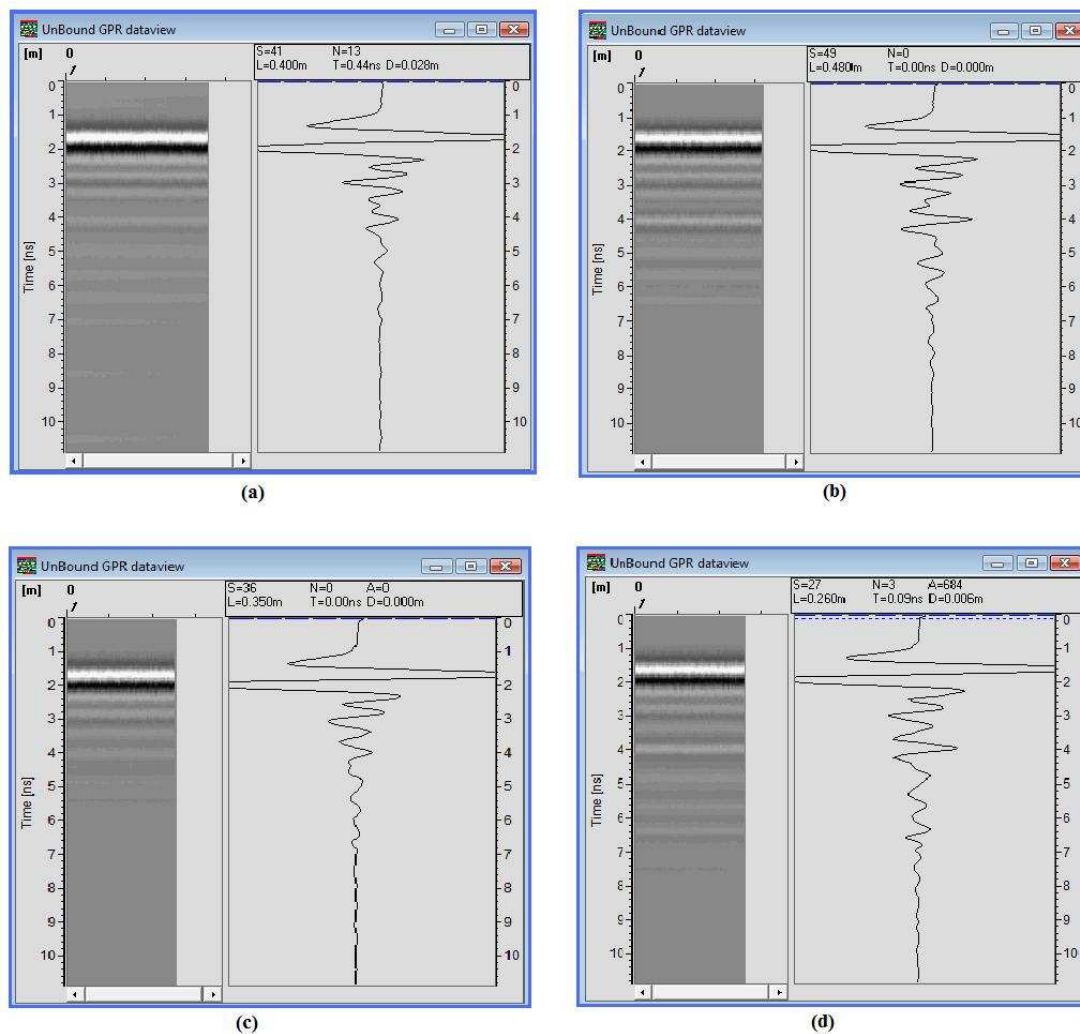


Figura 61. “Radargramas” obtidos no bordo direito sentido Brasília - BH. (a) “radargrama” obtido com o CBUQ no estado solto e sem a placa metálica. (b) “radargrama” obtido para o CBUQ no estado solto e com a placa metálica. (c) “radargrama” obtido para o CBUQ no estado compactado e sem a placa metálica. (d) “radargrama” obtido com o CBUQ no estado compactado e com a placa metálica.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos para o primeiro experimento de uma maneira geral se mostram promissores, ou seja, os resultados apontaram a possibilidade de se determinar as espessuras das camadas constituintes do pavimento, por meio de análise textural de radargramas, de maneira automatizada e indireta (não destrutiva). As imagens temáticas obtidas tiveram muitos pixels classificados erroneamente para as classes 2 (revestimento) e 4 (subleito) para os blocos utilizados. Já a classe 3 (macadame) seguida da classe 1 (off-set) foram as classes que tiveram melhores resultados levando em consideração as três componentes utilizadas na classificação. O esperado era que os blocos 10×10 pixels representassem melhor a superfície, uma vez que uma superfície espacial maior, poderia extrair a textura melhor da imagem e conseqüentemente fornecesse coeficientes que discriminasse melhor essas feições trazendo assim maior eficiência ao classificador utilizado (MaxVer), o que não se confirmou pelos testes estatísticos. Embora o $kappa = 0.62$ obtido para a imagem a 1 metro da reconstrução, ser considerado muito bom (Tabela 4), essa teve muitos pixels da classe 4 atribuídos erroneamente às outras classes. Com relação ao índice kappa condicional, a classe 1 obteve uma classificação considerada como “muito boa” para os coeficientes “diagonal e vertical”; a classe 2 como “boa” para o coeficiente “horizontal”; a classe 3 como “excelente” para o coeficiente “horizontal”; e a classe 4 como “péssimo” para os três coeficientes analisados. Uma possível alternativa para a melhoria dos resultados seria mudar o extrator de textura utilizado (*transformada wavelet*), valeria apenas testar outros extratores da família *wavelet*; outra opção seria utilizar outro tipo de interpolador, usando um que considere mais as tendências dos coeficientes ao se gerar a superfície, isso porque o interpolador *collocation* se ajusta perfeitamente aos pontos de controle, e se houver ruídos (pontos discrepantes), interferirá nos resultados, o que seria evitado por um interpolador que captura tendências; também seria interessante aumentar o número de amostras de treinamento e teste; devido ao fato do classificador Maxver assumir que as classes têm uma distribuição normal, o que pode não ter ocorrido neste caso, sugere-se usar outro classificador, tipo redes neurais, que não assume nenhuma distribuição dos dados.

Todavia, esse é um campo que vale a pena ser pesquisado mais profundamente, uma vez que os resultados alcançados se mostraram bastante promissores.

Para o segundo experimento, descrito na subseção 3.2, os objetivos específicos foram atingidos e a metodologia empregada para correlacionar a constante dielétrica da camada de revestimento com seu peso específico, usando a técnica de reflexão, se mostrou satisfatória apesar dos poucos pontos amostrados. Quando se compara os resultados obtidos neste experimento, verifica-se uma coerência com os resultados obtidos por (SAARENKETO, 2006), onde as constantes dielétricas obtidas ficaram entre (4 – 8). No entanto, vale ressaltar a dificuldade de se encontrar um local para a realização deste experimento seguida de autorização por parte da empresa responsável pela execução dos serviços. Devido a impossibilidades operacionais da empresa não foi possível realizar números maiores de ensaios o que enriqueceria ainda mais este trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULLAH, R.; SHAFRI, H. Z. M.; ROSLEE, M. B. **Data Analysis of Road Pavement Density Measurements Using Ground Penetrating Radar (GPR)**. Proceedings of the International Conference on Computer and Communication Engineering. May 13-15. Kuala Lumpur, Malaysia, 2008.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas - **NBR 7182/86: Solo - Ensaio de compactação**. São Paulo - SP, 1986.
- AGUIAR, J. C. M. **Radar de Penetração no Solo (GPR): Aspectos geofísicos e geodésicos, processamento e análises em pavimento flexível**. Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Cartográfica. Recife. Dissertação de mestrado (Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação). 2005. 128 p.
- AMER-YAHIA, C.; MAJIDZADEH, T. **Use of Ground Penetrating Radar for Quality Control Measurement on New Asphalt Overlays**. Resource International, Inc. 11th International Conference on Ground Penetrating Radar, June 19-22, Columbus, Ohio, USA. 2006.
- ANNAN, A. P.; DAVIS, J. L.; SCOTT, W. J. **Impulse Radar Wide Angle Reflexion and Refraction Sounding in Performance**. Geological Surveys of Canada, Paper 75 - 1C. 1975. p 335 – 341.
- ANNAN, A. P. **Ground Penetrating Radar**. Workshop Notes Sensors and Annual Meeting of SAGEEP, Chicago, April 26-29. 1992.
- BAPTISTA, C. N. **Pavimentação - Ensaio fundamentais para a pavimentação e dimensionamentos dos pavimentos flexíveis**. 2ª Ed. Porto Alegre: Editora Globo, Vol. 1. 1976. 249 p.
- BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica - Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro. Ed. Gráfica Imprinta. 2008. 504 p.
- CAMPBELL, J. E. **Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty Megahertz**. Soil. Sci. Soc. Am. J. 1990. p 332 – 341.
- CAO, Y. **Implementation of Ground Penetrating Radar**. 2007. Disponível em: <<http://www.lrrb.org/PDF/200734.pdf>>. Acesso em: 20 de agosto de 2008.
- CARCIONE, J. M.; CAVALLINE, F. **Ground penetrating radar: Wave theory and numerical simulation in lossy anisotropic media**. Geophysics, Vol 61. 1996. p 1664-1677.

- CASTAÑÓN, C. A. B. **Recuperação de imagens por conteúdo através da análise multirresolução por wavelets**. Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação - Universidade de São Paulo, São Carlos. Dissertação (Mestrado em Ciências de Computação e Matemática Computacional). 2003. 112 p.
- CNT. **Confederação Nacional do Transporte. Pesquisa Rodoviária 2007 – Relatório Gerencial**. 2007. Disponível em: <<http://sistemacnt.cnt.org.br/>>. Acesso em: 15 de março de 2009.
- CROSTA, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Campinas – SP. IG/UNICAMP. 1992. 170p.
- DAUBECHIES, I. **Ten lectures on wavelets**. Society for Industrial and Applied Mathematics. Philadelphia, PA, USA, Vol. 61. 1992.
- DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. **Ground Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy**. European Association of Geoscientists & Engineers. Geophysical Prospecting, Vol. 37. 1989. p 531 – 551.
- DER/MT. Departamento de Estradas de Rodagem do estado do Mato Grosso. **DNER-ME 213/94, Solos - Determinação do teor de umidade**, 1994.
- DER/SP. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. **IP-DE-P00/001: Projeto de Pavimentação**. 2006a. Disponível em:<http://www.der.sp.gov.br/documentos/normas/anexos/normas_pav01.aspx>. Acesso em: 15 maio 2009.
- DER/SP. Departamento de Estradas de Rodagem. **IP-DE-P00/004: Avaliação de Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos por meio de levantamento visual contínuo de defeitos da superfície**. São Paulo. 2006b.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **ME 043: misturas betuminosas a quente: ensaio Marshall para misturas betuminosas**. Rio de Janeiro. 1995.
- DNIT. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**. 3^a Ed. Rio de Janeiro. 2006. 274 p.
- DOURADO, T. C. **Aplicação de Técnicas Clássicas do Processamento Sísmico de Reflexão em dados de Radar (GPR) para Detecção de Hidrocarbonetos em Sedimentos Arenosos**. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia. Dissertação de mestrado (Geofísica). Salvador. 2004.
- DÓCUSSE, T. A. **Um método para melhoria de qualidade de imagens médicas utilizando a transformada wavelet**. Universidade Estadual Paulista. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação – Área de Concentração em Sistemas de Computação). UNESP. 2008.

- ESTRADAS. **História das Estradas - O Portal das Rodovias do Brasil**. Disponível em: < http://www.estradas.com.br/histrod_dutra.htm>. Acesso em ago. de 2009.
- FARIA, R. R. A. **Aplicação de *wavelets* na análise de gestos musicais em timbres de instrumentos acústicos tradicionais**. USP - Universidade de São Paulo. Dissertação de mestrado (Engenharia de Sistemas Eletrônicos). 1997.
- FELLNER-FELDEGG, H. **The Measurement of Dielectrics in the Time Domain**. Hewlet-Packard Laboratories, Palo Alto, California. *The Journal of Physical Chemistry*. Vol. 73. 1969. p 616 – 623.
- FERREIRA, E. R. **Procedimentos automáticos para apoio na avaliação de pavimentos com o uso de imagens digitais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil - Universidade de Viçosa, Viçosa. 2010. 260 p.
- FONSECA, L. M. G. **Processamento Digital de Imagens**. notas de aulas da disciplina Processamento Digital de Imagens nos programas de pós-graduação dos cursos de Sensoriamento Remoto e Computação Aplicada. INPE. 2000.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. Ed. John Wiley & Sons, Inc. New York. 1993. 517 p.
- GONÇALVES, F. P.; CERATTI, J. A. P. **Utilização do Ground Penetrating Radar na Avaliação de Pavimentos**. 31a Reunião Anual de Pavimentação, São Paulo – SP. 1998.
- GREAVES, R. J.; LESMES, D. P.; LEE, J. M.; TOKSÖS, M. N. **Velocity variations and water content estimated from multi-offset ground-penetrating radar**. *Earth Resources Laboratory, Dept. of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge*. Vol.61, n.3. 1996. p 683–695.
- HÄNNINEN, P. **Dielectric surveying for overburden classification**. *Geological Survey of Finland, Bulletin 396*. ISBN 951-690-688-5. 1997. 72 p.
- HARDY, R. L. **Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces**. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 43. 1971. p 475-492.
- HOEKSTRA, P.; DELANEY, A. **Dielectric Properties of Soils at UHF and Microwave Frequencies**. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 79, n.11. 1974. p 1699-1708.
- INPE. **Tutorial SPRING**. INPE, São José dos Campos. Disponível em: < <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/index.html>>. Acesso em 25 de junho de 2009.

- JIANG, Z.; GUO, X. **A note on the extension of a family of biorthogonal Coifman wavelet systems.** The Australian & New Zealand Industrial and Applied Mathematics Journal, ANZIAM, v 46. 2004. p 111–120.
- JOL, H. M.; SMITH, D. G. **Ground Penetrating Radar Surveys of Peatlands for Oilfield Pipelines in Canada.** Journal of Applied Geophysics, Vol. 34. 1995. p 109-123.
- JOL, H. M.; **Ground Penetrating Radar: Theory and Applications.** Ed. Elsevier Science, 1^a Ed. ISBN: 978-0-444-53348-7. 2009. 524 p.
- KNIGHT, R. **Ground Penetrating Radar for Environmental Applications.** Annual Reviews. Earth Planet. Sci. v 29. 2001. p 229–55.
- KNOLL, M. D.; KNIGHT, R. **Relationship between dielectric and hydrogeologic properties of sand-clay mixtures.** In: proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetration Radar, june 12-16. Kitchener, Ontario, Canada. v 1. 1994.
- KUJALA, K. **Factors affecting frost susceptibility and heaving pressure in soils.** Acta University Oulu C 58. 1991.
- LAU, C. L.; SCULLION, T.; CHAN, P. **Using Ground Penetrating Radar technology for pavement evaluations in Texas, USA.** Geological Survey of Finland, Special Paper, Vol. 16. 1992. p 277-283.
- REIGOTA, N. S. **Comparação da Transformada Wavelet Discreta e da Transformada do Cosseno, para compressão de imagens de impressão digital.** Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica. Dissertação de mestrado. USP – São Carlos. 2007.
- LOIZOS, A.; PLATI, C. **Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches.** Science Direct. NDT & E International. Vol. 40. 2007. p 147–157.
- LOPES, O. A. **Uso do GPR (Ground Penetrating Radar) em trechos de pavimentos da cidade universitária da UFRJ.** UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Dissertação de mestrado (Engenharia Civil). 2009.
- LYON, T. L.; BUCKMAN, H. O. **The nature and properties of soils.** Ed. The Macmillan Company, 5^a Ed. New York. 1952. 591 p.
- MANCILLA, L. O.; TREVIÑO, G. E. **Synthetic Radargrams from Electrical Conductivity.** Journal of Applied Geophysics, Vol. 34. 1996. p 283–290.
- MARQUES, G. L. O. **Pavimentação.** Universidade Federal de Juiz de Fora - Faculdade de Engenharia – Departamento de Transportes e Geotecnia. Disponível em: <<http://www.pavimentacao.ufjf.br/naulas.html>>. Acesso em: 18 de maio de 2009.

- MATHER, P. M. **Computer processing remotely-sensed images: an introduction.** The University of Nottingham. 3^a ed. Ed. John Wiley & Sons Ltd. England. Nottingham. 2004. 320 p.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos.** 2^a ed. Rio de Janeiro. ISBN: 85-905986-1-6. Ed. Jacques de Medina. 2005. 574 p.
- MELO, M. S. **Geofísica aplicada à arqueologia: Investigação no centro histórico Engenho Murututu, em Belém, Pará.** UFPA – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geofísica. Dissertação de Mestrado. 2007.
- MEYER, Y. **Wavelets: Algorithms and applications.** First edition, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1993.
- MISITI, M.; MISITI, Y.; OPPENHEIM, G.; POGGI, J. M. **The MathWorks Inc. Wavelet Toolbox User's Guide.** 2006.
- MITCHELL, J. K. **Fundamentals of soil Behaviour.** 2^a ed. Ed. John Wiley & Sons Ltd, New York. 1993. p 437.
- NCHRP, National Cooperative Highway Research Program. **Ground Penetrating Radar for Evaluating Subsurface Conditions for Transportations Facilities.** Transportation Research Board, Washington, USA, DC. 1998.
- NISHIDA, W. **Uma Rede Neural Artificial para Classificação de Imagens Multiespectrais de Sensoriamento Remoto.** - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Dissertação de mestrado (Engenharia de Produção). 1998.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias.** In: Simpósio brasileiro de solos tropicais em engenharia. COOPE / CNPq / ABMS. Rio de Janeiro. 1981.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias.** Rio de Janeiro: Vilibor, 1995.
- PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2000. 247 p.
- PNLT. 2007. Ministério dos Transportes e Ministério da Defesa - **Plano Nacional de Logística e Transporte.** 2007. Disponível em: <http://www.centran.eb.br/docs/proj_estru/logistica/info_gerais_pnltho2007.pdf>. Acesso em: 15 de mar. de 2009.
- POPINI, M. V. F. **Processamento de Dados de GPR Utilizando o Método da Sísmica de Reflexão.** – Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA. Dissertação de mestrado (Geofísica). 2001. 70 p.
- PROCTOR, R. R. **Fundamental principles of soil compaction.** Engineering News Record, Vol. 3. New York. 1933.

- RAVASKA, O.; SAARENKETO, T. **Dielectric properties of road aggregates and their effect on GPR surveys**. Proc. 2nd Int. Symposium on Frost in Geotechnique Eng., Anchorage, USA. Balkema. 1993. p 17-22.
- SAARENKETO, T.; SCULLION, T. **Using Electrical Properties to Classify the Strength Properties of Base Course Aggregates**. Research Report 1341-2. Texas Transportation Institute, College Station, Texas. 1995. 71 p.
- SAARENKETO, T. **Using ground penetrating radar and dielectric probe measurements in pavement density quality control**. Paper submitted for presentation and publication at the Annual Meeting of the Transportation Research Board Washington, D.C. 1997.
- SAARENKETO, T. **Electral properties of water in clay and silty soil**. Journal of Applied Geophysics, Vol. 40. Finnish National Road Administration, Road District of Lapland, FIN-96101 Rovaniemi, Finland. 1998. p 73 – 78.
- SAARENKETO, T.; ROIMELA, P. **Ground Penetrating Radar technique in asphalt pavement density quality control**. Proceeding of the Seventh International Conference on Ground Penetrating Radar, Vol. 2, May 27-30, Lawrence KS. 1998. p. 461-466.
- SAARENKETO, T.; SCULLION, T. **Road Evaluation with Ground Penetrating Radar**. Journal of Applied Geophysics. Vol. 43. 2000. p 119 – 138.
- SAARENKETO, T. **Measuring electromagnetic properties of asphalt for pavement quality control and defect mapping**. 2003. Disponível em: <[http://vgwww.vegagerdin.is/nvf33.nsf/7c5e95b3edddb9e980256f620045f483/6423655ed26a5bd400256de90031ecaf/\\$FILE/Asphalt_electromagnetics_TimoS_030603.pdf](http://vgwww.vegagerdin.is/nvf33.nsf/7c5e95b3edddb9e980256f620045f483/6423655ed26a5bd400256de90031ecaf/$FILE/Asphalt_electromagnetics_TimoS_030603.pdf)>. Acesso em: 20 de ago. de 2008.
- SAARENKETO, T. **Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys**. PhD thesis. Faculty of Science, Department of Geoscience, University of Oulu, P.O. Box 3000, FI-90014. Oulu: Oulu University Press, 2006. 127 p.
- SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 1. ed. São Paulo: Pini Ltda, Vol. 2. ISBN 85-7266-125-5. 2001. 671 p.
- SILVA, C. Y. V. W. **Extração de características de imagens médicas utilizando wavelets para mineração de imagens e auxílio ao diagnóstico**. USP – Universidade de São Paulo. São Carlos. Dissertação de Mestrado. 2007.
- SPRING. Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. Camara G, Souza RCM, Freitas UM, Garrido J. Computers & Graphics, 20: (3). May-Jun. 1996. p 395-403.

- SUTINEN, R. **Glacial deposits, their electrical properties and surveying by image interpretation and ground penetration radar.** Geological survey of Finland, Bulletin 359. 1992. 123 p.
- SUTINEN, R.; HÄNNINEN, P. **Radar profiling and dielectrical properties of glacial deposits in North Finland.** Proc. 6th International IAEG Congress, Amsterdam. 1990. p 1045 – 1051.
- TANG, T.; YEUNG, A. T. **Full-Scale Field Testing of Surface Waves – TDR Technique in Integrity Evaluation of Large-Diameter Bored Piles.** Proc. TDR 2006, Purdue University, West Lafayette, USA, Sept. 2006, Paper ID 45. 2006. 10 p.
- TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIF, R. E. **Applied Geophysics.** 2^a ed. Cambridge: Cambridge University Press. 1990. 770 p.
- TRINDADE, T. P. et al. **Compactação dos solos: fundamentos Teóricos e Práticos.** 1 Ed. ed. Viçosa: Editora UFV, Universidade Federal de Viçosa, Vol. 1. ISBN ISBN:978-857269-331-8. 2008. 95 p.
- ULRIKSEN, C. P. F. **Application of Impulse Radar to Civil Engineering.** Doctoral Thesis. Lund University of Technology. Department of Engineering Geology. 1982. 179 p.
- VETTERLI, M.; HERLEY, C. **Wavelets and filter banks: Theory and design.** IEEE Transactions on Signal Processing. Vol. 40. 1992. p. 2207–2232.
- VIEIRA, C. A. O. **Accuracy of remotely sensing classification of agricultural crops: A comparative study.** PhD Thesis. University of Nottingham. Nottingham: University of Nottingham, 2000. 327p.
- WALTHER, E. G.; PITCHFORD, A. M.; OLHOEFT, G. R. **A strategy for detecting subsurface organic contaminants.** Natl. Water Well Assoc./API Conf. Petrol. Hydrocarb.Org. Chem. Ground Water Prev., Detect. Restor., Houston, Nov.12–14. Dublin, OH: Natl.Water Well Assoc, 1986. p 357–81.
- WEI, D.; EVANS, B. L.; BOVIK, A. C. **Generalized coiflets: A new family of orthonormal wavelets.** In: IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, CA USA. 1997. p. 101–104.
- WICKERHAUSER, M. V. **Adapted wavelet analysis from theory to software.** Ed. A K Peters, Ltd. Wellesley, MA. ISBN: 1-56881-041-5. 1994. 486 p.
- ZBY EK, P. et al. **A Comparison of Capacitance and TDR Techniques for Determination of Moisture Profiles in Building Materials.** 2005. Disponível em: <<http://sensors.ipan.lublin.pl/abs14.html>>. Acesso em: 30 de jul. de 2009.

APÊNDICE 1

Esta rotina em “*matlab*” calcula os coeficientes “*wavelets*” das 3 sub-bandas de alta frequência na multirresolução *wavelet* (1 nível, Daubechies 4) de imagens. Utilizando janelas (blocos) 4x4 pixels. Apresentando como resultado:

Arquivos com os “*coeficientes wavelets*” para serem usados na rotina “*funcpow*” e “*transform60*” assim distribuídos: arquivos com os coeficientes da sub-banda de alta frequência horizontal (sbhfls0_); de alta frequência vertical (sbvfls0_) e de alta frequência diagonal (sbdfls0_). O número de arquivos gerados dependem das dimensões da imagem.

```
function [b] = mccwfun(jan)
[imagem, pathname] =
uigetfile({'*.tif;*.jpeg;*.jpg;*.bmp;*.gif','Arquivos com 8 Bits
(*.tif,*.gif,*.bmp,*.jpeg,*.jpg)';'*.*', 'todos os arquivos
(*.*)'}, 'Escolha a imagem (MCCWFUN)');
a=imread(imagem);
imagesc(a); % mostra a imagem lida
[tl tc] = size(a); % calcula o número de linhas (tl) e colunas
(tc) da imagem
jan=input('Tamanho do bloco(janela): '); % tamanho da janela
ad=double(a); % a função wavelet exige que a imagem tenha precisão
dupla

% Cálculo da "MATRIZ COLUNA", com NC=DMCW, NL=3*DMCW*NB
% (matriz com num. col. = dim. matriz coef. wavelets na subbanda,
sbh=[ ];
sbv=[ ];
sbd=[ ];
aa=[ ];
bb=[ ];
cc=[ ];
dd=[ ];
nf=1;
while nf<=fix(tl/jan)
n=1;
z=1;
while n<jan*fix(tc/jan) %esse loop é para 1 faixa de
tamanho "jan"
k=0;
for i=jan*nf-(jan-1):jan*nf %esse loop é para 1 bloco
de tamanho "jan"
t=0;
k=k+1;
for j=n:(jan-1+n)
t=t+1;
b(k,t)=ad(i,j);
end
end
```

```

        end
        [c,s]=wavedec2(b,1,'db4');           % mutidecomposição, nível 1,
daubechies 4
        ca=appcoef2(c,s,'db4',1);           % extração coef.de
aproximação
        ch1=detcoef2('h',c,s,1);           % extração coef. horizontal
        cv1=detcoef2('v',c,s,1);           % extração coef. vertical
        cd1=detcoef2('d',c,s,1);           % extração coef. diagonal
        [b2 b1]=size(ch1);
        sbh=[sbh;ch1];                       % matriz com os coef. da sub-banda
horizontal
        sbv=[sbv;cv1];                       % matriz com os coef. da sub-banda
vertical
        sbd=[sbd;cd1];                       % matriz os coef. da sub-banda
diagonal
        n=n+jan;
        z=z+b1;

        end
        nf=nf+1;
    end

% Cálculo dos vetores com os coeficientes das sub-bandas
% aa - vetor com todos os coeficientes da sub-banda horizontal (NC=1
e
% NL=DMCW*NB*NF); COM NF=num.de faixas=NL/TB e NL=num.linhas e
TB=tamanho
% do bloco
% bb - vetor com todos os coeficientes da sub-banda vertical
% cc - vetor com todos os coeficientes da sub-banda diagonal
sbht=sbh';
sbvt=sbv';
sbdT=sbd';
for i=1:b1*(tc/jan)*(tl/jan)
    a=sbht(:,i);
    aa=[aa;a];
    b=sbvt(:,i);
    bb=[bb;b];
    c=sbdT(:,i);
    cc=[cc;c];
end

% Cálculo da matriz para leitura no programa funcpow

%%%%%início - arrumando a primeira linha do arquivo, variável X%%%%
pos =0;
for i=1:b1*(tc/jan)*(tl/jan) % ta contando 1 a n, tem de variar de 1
a 5
    for j=1:5
        d=[pos j];
        dd=[dd;d];
    end
    pos = pos + 0.25;
    if (pos == 1.25)
        pos = 0;
    end
end
%%%%% fim - arrumando a primeira linha do arquivo, variável X%%%%

resph=[dd aa];

```

```

respv=[dd bb];
respd=[dd cc];

%Re-escalando os valores da sub-banda horizontal
maior=max(resph);
menor=min(resph);
j=1;

nomepasta=strcat('Radar_', imagem);
mkdir(nomepasta); % cria uma pasta com o nome da imagem

tbc=ceil(tc/jan); % total de blocos na coluna

k=1;
numerolinhas=25;
t=1;
for i=1:b1*b1*(tc/jan)*(t1/jan)
    sbhf(k,j)=resph(i,j);
    sbhf(k,j+1)=(resph(i,j+1)-menor(1,2))/(maior(1,2)-
menor(1,2));
    sbhf(k,j+2)=(resph(i,j+2)-menor(1,3))/(maior(1,3)-
menor(1,3));

    if (mod(k,25) == 0) % se k é múltiplo de 25
        s=strcat(nomepasta,'\');
        s=strcat(s, 'sbhfls0_');
        s=strcat(s, num2str(t, '%d')); % número inteiro
        s=strcat(s, '.TSA');
        dlmwrite(s,numerolinhas,' ');
        dlmwrite(s,sbhf,'-append','delimiter',' ');

        t=t+1;
        clear sbhf;
        k=0;

    end

    k=k+1;
end

%Re-escalando os valores da sub-banda vertical
maior=max(respv);
menor=min(respv);
j=1

k=1;
numerolinhas=25;
t=1
for i=1:b1*b1*(tc/jan)*(t1/jan)
    sbvf(k,j)=respv(i,j);
    sbvf(k,j+1)=(respv(i,j+1)-menor(1,2))/(maior(1,2)-menor(1,2));
    sbvf(k,j+2)=(respv(i,j+2)-menor(1,3))/(maior(1,3)-menor(1,3));

    if (mod(k,25) == 0)
        s=strcat(nomepasta, '\');
        s=strcat(s, 'sbvfls0_');
        s=strcat(s, num2str(t, '%d')); % número inteiro
        s=strcat(s, '.TSA');
    end
end

```

```

dlmwrite(s,numerolinhas,' ');
dlmwrite(s,sbvf,'-append','delimiter',' ');

t=t+1;
clear sbvf;
k=0;

end

k=k+1;

end

%Re-escalando os valores da sub-banda diagonal
maior=max(respv);
menor=min(respv);
j=1

k=1;
numerolinhas=25;
t=1
for i=1:b1*b1*(tc/jan)*(t1/jan)
    sbdf(k,j)=respd(i,j);
    sbdf(k,j+1)=(respd(i,j+1)-menor(1,2))/(maior(1,2)-menor(1,2));
    sbdf(k,j+2)=(respd(i,j+2)-menor(1,3))/(maior(1,3)-menor(1,3));

    if (mod(k,25) == 0) % se k é múltiplo de 25
        s=strcat(nomepasta, '\');
        s=strcat(s, 'sbdfls0_');
        s=strcat(s, num2str(t, '%d')); % precisão de 4 dígitos
        s=strcat(s, '.TSA');
        dlmwrite(s,numerolinhas,' ');
        dlmwrite(s,sbdf,'-append','delimiter',' ');

        t=t+1;
        clear sbdf;
        k=0;

    end

    k=k+1;

end
end

```

APÊNDICE 2

Esta rotina em “*matlab*” calcula os coeficientes “*wavelets*” das 3 sub-bandas de alta frequência na multirresolução *wavelet* (1 nível e daubechies 4) de imagens. Utilizando janelas (blocos)10x10 pixels. Apresentando como resultado:

Arquivos com os “*coeficientes wavelets*” para serem usados na rotina “*funcpow*” e “*transform60*” assim distribuídos: arquivos com os coeficientes da sub-banda de alta frequência horizontal (sbhfls0_); de alta frequência vertical (sbvfls0_) e de alta frequência diagonal (sbdfls0_). A quantidade de arquivos gerados dependem das dimensões da imagem.

```
%NC=num. colunas,
%DMCW=dim. matriz coef. wavelets na subbanda;
%NB=numero de blocos
function [b] = mccwfun(jan)
[imagem, pathname] =
uigetfile({'*.tif;*.jpeg;*.jpg;*.bmp;*.gif','Arquivos com 8 Bits
(*.tif,*.gif,*.bmp,*.jpeg,*.jpg);*.*', 'todos os arquivos
(*.*)'}, 'Escolha a imagem (MCCWFUN)');
a=imread(imagem);
imagesc(a); % mostra a imagem lida
[tl tc] = size(a); % calcula o número de linhas (tl) e colunas
(tc) da imagem
jan=input('Tamanho do bloco(janela): '); % tamanho da janela
ad=double(a); % a função wavelet exige que a imagem tenha precisão
dupla

% Cálculo da "MATRIZ COLUNA", com NC=DMCW, NL=3*DMCW*NB
% (matriz com num. col. = dim. matriz coef. wavelets na subbanda,
sbh=[ ];
sbv=[ ];
sbd=[ ];
aa=[ ];
bb=[ ];
cc=[ ];
dd=[ ];
nf=1;
    while nf<=fix(tl/jan)
        n=1;
        z=1;
            while n<jan*fix(tc/jan) %esse loop é para 1 faixa de
tamanho "jan"
                k=0;
                for i=jan*nf-(jan-1):jan*nf %esse loop é para 1 bloco
de tamanho "jan"
                    t=0;
```

```

        k=k+1;
        for j=n:(jan-1+n)
            t=t+1;
            b(k,t)=ad(i,j);
        end
    end
    [c,s]=wavedec2(b,1,'db4');           % mutidecomposição, nível 1,
daubechies 4
    ca=appcoef2(c,s,'db4',1);           % extração coef.de
aproximação
    ch1=detcoef2('h',c,s,1);            % extração coef. horizontal
    cv1=detcoef2('v',c,s,1);            % extração coef. vertical
    cd1=detcoef2('d',c,s,1);            % extração coef. diagonal
    [b2 b1]=size(ch1);
    sbh=[sbh;ch1];                       % matriz com os coef. da sub-banda
horizontal
    sbv=[sbv;cv1];                       % matriz com os coef. da sub-banda
vertical
    sbd=[sbd;cd1];                       % matriz os coef. da sub-banda
diagonal
    n=n+jan;
    z=z+b1;

    end
    nf=nf+1;
end

% Cálculo dos vetores com os coeficientes das sub-bandas
% aa - vetor com todos os coeficientes da sub-banda horizontal (NC=1
e
% NL=DMCW*NB*NF); COM NF=num.de faixas=NL/TB e NL=num.linhas e
TB=tamanho
% do bloco
% bb - vetor com todos os coeficientes da sub-banda vertical
% cc - vetor com todos os coeficientes da sub-banda diagonal
sbht=sbh';
sbvt=sbv';
sbdT=sbd';
for i=1:b1*(tc/jan)*(t1/jan)
    a=sbht(:,i);
    aa=[aa;a];
    b=sbvt(:,i);
    bb=[bb;b];
    c=sbdT(:,i);
    cc=[cc;c];
end

% Cálculo da matriz para leitura no programa "funcpow e transform60"

%%%início - arrumando a primeira linha do arquivo, variável X%%%

pos =0;

for i=1:b1*(tc/jan)*(t1/jan) % ta contando 1 a n, tem de variar de 1
a 9
    for j=1:8
        d=[pos j];
        dd=[dd;d];
    end
    pos = pos + single(1/7);
end

```

```

        if (pos == single(1+1/7))
            pos = 0;
        end
    end
end
##### fim - arrumando a primeira linha do arquivo, variável X#####

resph=[dd aa];
respv=[dd bb];
respd=[dd cc];

%Re-escalando os valores da sub-banda horizontal
maior=max(resph);
menor=min(resph);
j=1;

nomepasta=strcat('Radar_', imagem);
mkdir(nomepasta); % cria uma pasta com o nome da imagem
tbc=ceil(tc/jan); % total de blocos na coluna

k=1;
numerolinhas=64;
t=1;
for i=1:b1*b1*(tc/jan)*(t1/jan)
    sbhf(k,j)=resph(i,j);
    sbhf(k,j+1)=(resph(i,j+1)-menor(1,2))/(maior(1,2)-
menor(1,2));
    sbhf(k,j+2)=(resph(i,j+2)-menor(1,3))/(maior(1,3)-
menor(1,3));

        if (mod(k,64) == 0) % se k é múltiplo de 64
            s=strcat(nomepasta,'\');
            s=strcat(s, 'sbhfls0_');
            s=strcat(s, num2str(t, '%d')); % número inteiro
            s=strcat(s, '.TSA');
            dlmwrite(s,numerolinhas,' ');
            dlmwrite(s,sbhf,'-append','delimiter',' ');

            t=t+1;
            clear sbhf;
            k=0;

        end

        k=k+1;
end

%Re-escalando os valores da sub-banda vertical
maior=max(respv);
menor=min(respv);
j=1;

k=1;
numerolinhas=64;
t=1;
for i=1:b1*b1*(tc/jan)*(t1/jan)
    sbvf(k,j)=respv(i,j);
    sbvf(k,j+1)=(respv(i,j+1)-menor(1,2))/(maior(1,2)-menor(1,2));
    sbvf(k,j+2)=(respv(i,j+2)-menor(1,3))/(maior(1,3)-menor(1,3));
end

```

```

        if (mod(k,64) == 0) % se k é múltiplo de 64
        s=strcat(nomepasta, '\\');
        s=strcat(s, 'sbvfls0_');
        s=strcat(s, num2str(t, '%d')); % número inteiro
        s=strcat(s, '.TSA');
        dlmwrite(s,numerolinhas,' ');
        dlmwrite(s,sbvf,'-append','delimiter',' ');

        t=t+1;
        clear sbvf;
        k=0;

    end

    k=k+1;

end

%Re-escalando os valores da sub-banda diagonal
maior=max(respv);
menor=min(respv);
j=1

k=1;
numerolinhas=64;
t=1
for i=1:b1*b1*(tc/jan)*(t1/jan)
    sbdf(k,j)=respd(i,j);
    sbdf(k,j+1)=(respd(i,j+1)-menor(1,2))/(maior(1,2)-menor(1,2));
    sbdf(k,j+2)=(respd(i,j+2)-menor(1,3))/(maior(1,3)-menor(1,3));

        if (mod(k,64) == 0) % se k é múltiplo de 81
        s=strcat(nomepasta, '\\');
        s=strcat(s, 'sbdfls0_');
        s=strcat(s, num2str(t, '%d')); % precisão
        s=strcat(s, '.TSA');
        dlmwrite(s,numerolinhas,' ');
        dlmwrite(s,sbdf,'-append','delimiter',' ');

        t=t+1;
        clear sbdf;
        k=0;

    end

    k=k+1;

end

```

APÊNDICE 3

A Figura 62 abaixo apresenta alguns exemplos das superfícies geradas pelo interpolador “*collocation*” para a imagem a 33 cm da reconstrução, bloco 4x4.

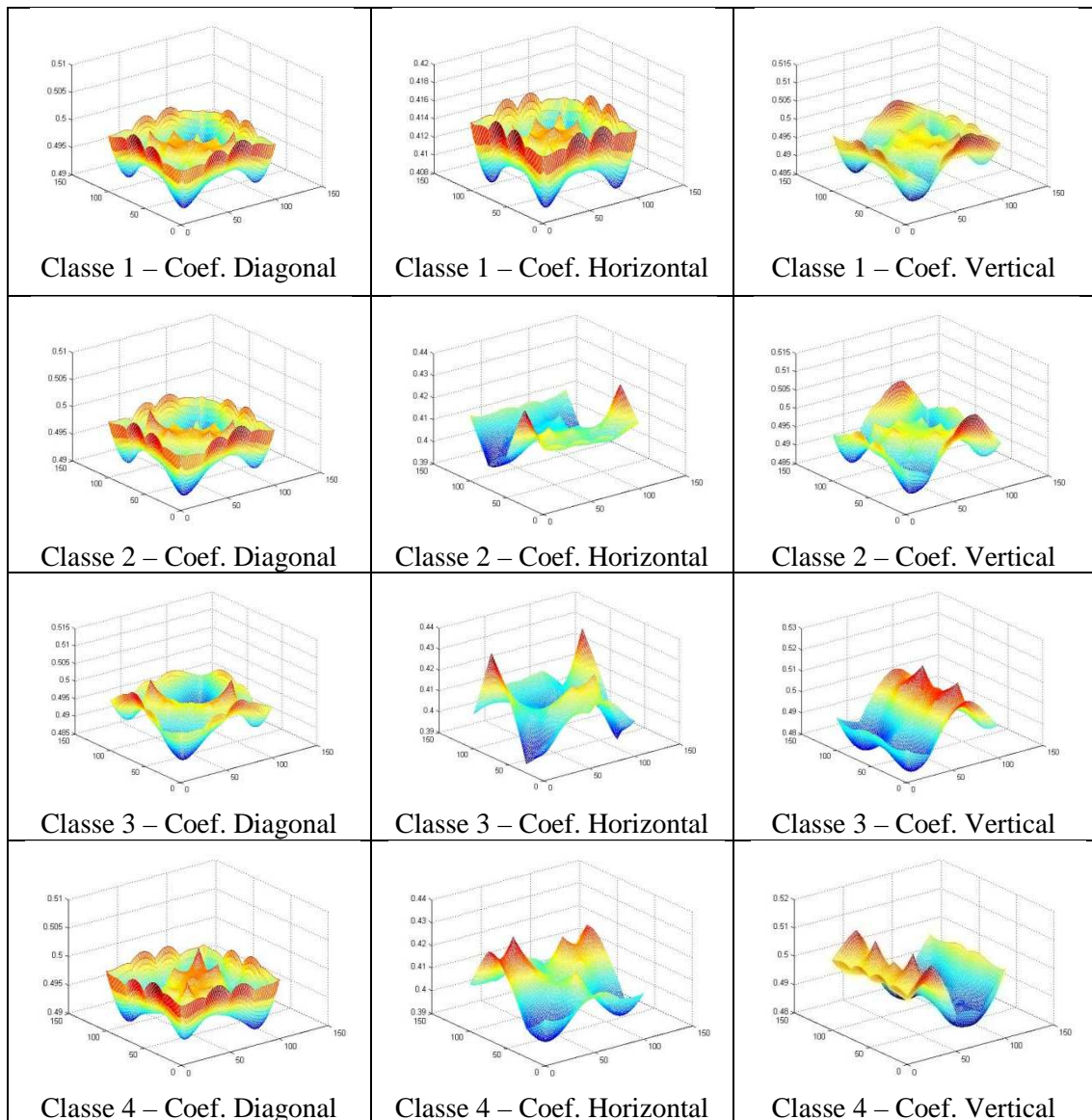


Figura 62. Superfícies geradas pelo interpolador *Collocation* para a imagem extraída a 30cm da borda da reconstrução, para os coeficientes diagonal, horizontal e vertical utilizando bloco 4x4.

APÊNDICE 4

A Figura 63 abaixo apresenta alguns exemplos das superfícies geradas pelo interpolador “*collocation*” para a imagem a 33 cm da reconstrução, bloco 10x10.

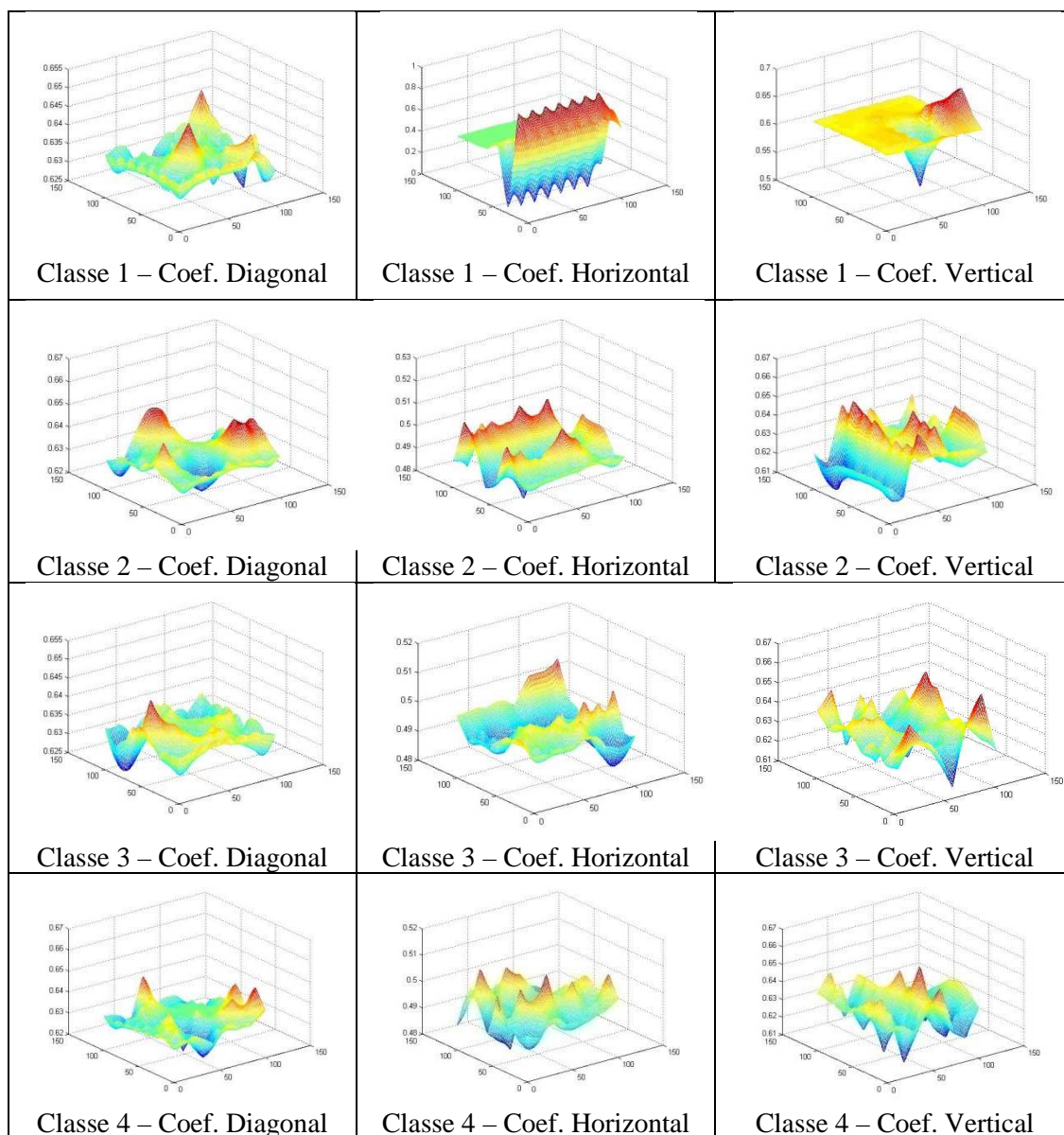


Figura 63. Superfícies geradas pelo interpolador *Collocation* para a imagem extraída a 30 cm da borda da reconstrução, para os coeficientes diagonal, horizontal e vertical utilizando bloco 10x10.

APÊNDICE 5

Esta rotina importa os dados do radar no formato original RAMAC (*.RD3) e grava em Excel(*.xls).

```
%O "importard3" importa dados no formato "*.rd3" para o MATLAB.
%Descricao:
%A = importard3;
%Abre uma caixa de diálogo "open file" para a escolha do arquivo.
%A Matrix A é criada.
%As linhas da Matriz possui o tempo duplo de viagem do pulso.
%As colunas é a localização da antena.
%[A,samples,traces] = importard3; Retornará a matrix A e suas
variaveis
%variables "samples" e "traces", que contêm as dimensoes de A.

function [A,samples,traces,pathname,dat] = importard3;

[dat,pathname]= uigetfile ('*.rd3', 'Importa arquivo de radar no
formato RAMAC'); %Perguntará pelo arquivo

name=double(dat);
chrctrs=size(name);
header=char([name(1:chrctrs(2)-2),97,100]);

%Abre o cabeçalho do arquivo e lê o número de amostras e traços
fid=fopen([pathname,header],'r');

for k=1:30 % Lê o cabeçalho
    line=fgetl(fid);
    if ~isempty(findstr('SAMPLES:',line))
        pt=findstr('SAMPLES:',line);
        samples=str2num(line(pt+8:length(line)));
    end
    if ~isempty(findstr('LAST TRACE:',line))
        pt=findstr('LAST TRACE:',line);
        traces=str2num(line(pt+11:length(line)));
    end
end

fclose(fid);%Fecha o cabeçalho
fid=fopen([pathname,dat],'r'); %Abre os dados
A=fread(fid,[samples,traces],'int16');
imagesc(A); %Plota a matriz A
colormap gray; %Plota a imagem em grayscale
axis off; %desabilita os eixos

[pathstr,name,ext,versn] = fileparts(name)
nomearquivo=strcat(name);
xlswrite(nomearquivo,A);
fclose(fid);
```